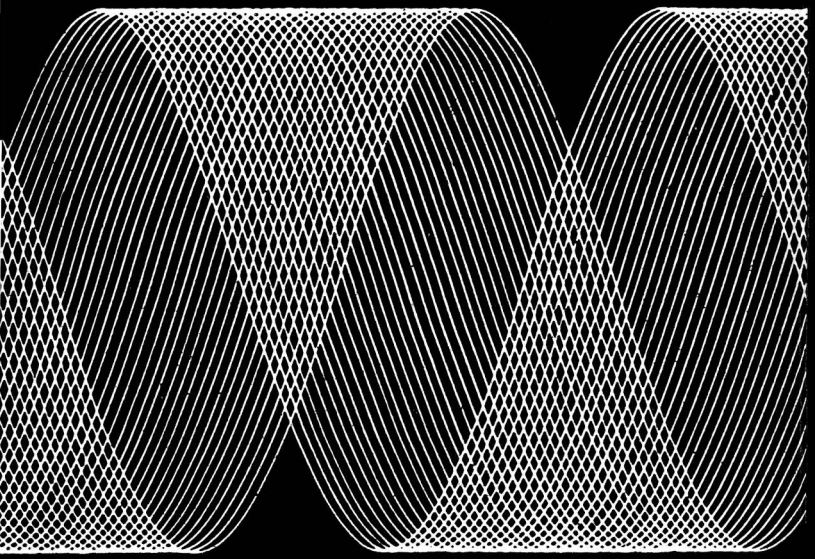
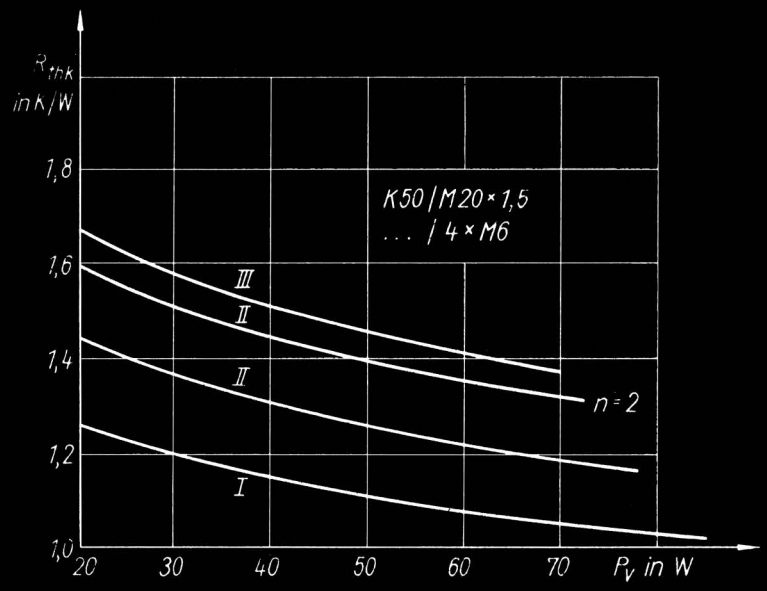
amateurreihe

electronica





Helmut Hantzsch

161

Wärmeableitung bei Halbleitern

Leer

electronica · Band 161

HELMUT HANTZSCH

Wärmeableitung bei Halbleitern

MILITÄRVERLAG
DER DEUTSCHEN DEMOKRATISCHEN
REPUBLIK

1. Auflage, 1978, 1.—15. Tausend
© Militärverlag der Deutschen Demokratischen Republik
VEB — Berlin, 1978
Cheflektorat Militärliteratur
Lizenz-Nr. 5 · LSV: 3539
Lektor: Rainer Erlekampf
Zeichnungen: Gudrun Maraun
Typografie: Helmut Herrmann · Hersteller: Michael Haase
Vorauskorrektor: Ingeborg Kern . Korrektor: Ilse Fähndrich
Printed in the German Democratic Republic
Gesamtherstellung: Druckerei Märkische Volksstimme, Potsdam
Redaktionsschluß: 20. 11. 77
Bestellnummer: 746 006 3
DDR 1,90 M

Inhaltsverzeichnis

Vorwort		5
1.	Physikalische Grundlagen	6
1.1.	Einleitung	6
1.2.	Wärmeaufnahme	7
1.3.	Wärmeabgabe des erwärmten Körpers	8
1.3.1.	Wärmeabgabe durch Leitung	8
1.3.2.	Wärmeabgabe durch Konvektion	11
1.3.3.	Wärmeabgabe durch Strahlung	15
1.4.	Zeitlicher Temperaturverlauf bei Erwärmung eines Körpers	16
2.	Thermische Zusammenhänge bei Halbleitern	19
2.1.	Einflüsse auf die Sperrschichttemperatur	19
2.2.	Zweiter Durchbruch	20
2.3.	Methoden der Wärmeableitung	21
3.	Thermische Berechnungen	24
3.1.	Die thermischen Ersatzschaltbilder im statischen Betrieb	24
3.1.1.	Thermisches Ersatzschaltbild eines direkt auf ein Kühlblech montierten Transistors	24
3.1.2.	Thermisches Ersatzschaltbild eines isoliert auf ein Kühlblech montierten Transistors	27
3.2.	Analoge Beziehungen der thermischen Ersatzschaltbilder	30
4.	Ermittlung der Daten von Kühlblechen, Kühlprofilen und Kühlkörpern	32
4.1.	Ermittlung der Größen von Kühlblechen	32
4.1.1.	Berechnung von Kühlblechen mit Formeln	32
4.1.2.	Auswahl von Kühlblechen aus Kurven	36
4.2.	Berechnung von Kühlprofilen	39
4.2.1.	Auswahl nach Diagrammen	39
4.2.2.	Kühlprofilauswahl mit Erwärmungskurven	44
4.2.3.	Zwangskühlung von Kühlprofilen	47
4.3.	Einsatz von Kühlkörpern	51

4.3.1. Allgemeines, Einbau, Auswahl 51
4.3.2. Zwangskühlung von Kühlkörpern 53
4.3.3. Kühlkörper für Dioden und Thyristoren 53
4.3.3.1. Kühlkörper *K 10* 54
4.3.3.2. Kühlkörper *K 25* 57
4.3.3.3. Kühlkörper *K 50* 60
4.3.3.4. Kühlkörper *K 200* 64
4.3.3.5. Kühlbleche für Dioden und Thyristoren 68
4.3.3.6. Verwendung der K-Reihe für Transistoren 69
5. Temperaturmessung an Kühlblechen, Kühlprofilen und Kühlkörpern 70
5.1. Allgemeines 70
5.2. Temperaturfühler 70
5.3. Grundschaltung zur Messung 71
5.3.1. Der Thermistor in der Brückenschaltung 73
5.3.2. Eichung der Meßschaltung 77
5.4. Temperaturmeßschaltungen 78
5.4.1. Anzeige mit Strommesser 78
5.4.2. Direkte Anzeige 82
5.4.3. Anzeige mit Röhrenvoltmeter 83
6. Tabellenanhang 85
7. Verzeichnis der Formelzeichen 88
8. Literaturverzeichnis 93

Vorwort

Diese Broschüre ist für den fortgeschrittenen Amateur gedacht. Es werden, ausgehend von den physikalischen Grundlagen, die Probleme der Wärmeableitung erläutert und die Möglichkeiten der Berechnung von Kühlblechen, Kühlprofilen und Kühlkörpern dargelegt.

Gleichzeitig wird der Versuch unternommen, den Amateur an das Internationale Einheitssystem (S I) heranzuführen.

Da bei der Angabe von Temperaturdifferenzen (z. B. Temperaturkoeffizienten, Wärmeleitfähigkeit, Thermischer Widerstand u. a.)

$$1\ \mathrm{K} = 1\ ^{\circ}\mathrm{C}$$

gilt, wurden diese Festlegungen auch angewandt. Angaben von Temperaturpunkten oder dort, wo zusätzliche Umrechnungen notwendig wären, wurden in °C angegeben.

Ich hoffe, daß dem Amateur mit dieser Broschüre Anregungen zur Lösung seiner Kühlprobleme gegeben werden.

1. Physikalische Grundlagen

1.1. Einleitung

Ein Umformorgan elektrischer Energie in Wärme ist der Widerstand. Diese sogenannte *Joule*sche Wärme entsteht an elektrischen Geräten, wo Widerstände vom Strom durchflossen werden. Während Bügeleisen, Kochplatten und andere elektrische Geräte so gebaut sind, daß möglichst hohe Temperaturen entstehen, bedeutet die Erwärmung z. B. von Motoren, Generatoren, Transistoren eine Verlustenergie. Die zuletzt genannten Geräte muß man deshalb so gestalten und betreiben, daß die entstehende Wärme möglichst klein gehalten und weitgehend an die Umgebung abgeführt wird, um die auftretende Übertemperatur niedrig zu halten [1]. Ein Teil der zugeführten Energie speichert das Gerät und erhöht damit die Temperatur. Der Rest wird auf Grund der Temperaturerhöhung nach Maßgabe konstruktiver Merkmale und der Art der Umgebung wieder abgegeben, wobei im Prinzip 3 Arten von Energieabgabe möglich sind: *Wärmeleitung*, *Konvektion* und *Strahlung*.

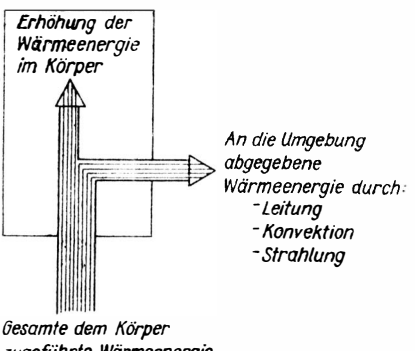


Bild 1.1
Energiebilanz bei Erwärmung eines Körpers [1]

1.2. Wärmeaufnahme

Die Erhöhung der Wärmeenergie $\triangle W_{th}$ eines Körpers mit der Masse m ist auf dessen Temperaturerhöhung $\triangle \vartheta$ zurückzuführen.
Die Energieerhöhung und die Temperaturerhöhung sind einander proportional.

$$\triangle W_{th} \sim \triangle \vartheta$$

Die Proportionalitätskonstante ist hierbei die spezifische Wärme c.

$$\triangle W_{th} = c \cdot m \cdot \triangle \vartheta \tag{1.1}$$

$$W_{th} = c \cdot m \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_1)$$

Die spezifische Wärme c eines Körpers stellt diejenige Wärmemenge eines Stoffes dar, die erforderlich ist, 1 g davon um 1 K zu erwärmen.
Die Einheit der spezifischen Wärme c ist J/K · kg.
Das Produkt aus der spezifischen Wärmekapazität c und der Masse m eines Körpers ergibt dessen Wärmekapazität C.

$$C = c \cdot m$$

Die Einheit der Wärmekapazität C ist J/K.
Die Wärmekapazität C ist zahlenmäßig gleich derjenigen Wassermenge, die zu einer bestimmten Temperaturerhöhung die gleiche Wärmeenergie braucht wie z. B. ein Körper, da c für Wasser definitionsgemäß 1 ist.
Für die Wärmemenge gilt damit auch

$$W_{th} = C\,(\vartheta_2 - \vartheta_1)\,.$$

Die Wärmeenergie W_{th} läßt sich prinzipiell in allen Energieeinheiten messen, bevorzugt wird aber die Kalorie [3].

$$1\ \text{cal} = 4{,}1868\ \text{J} = 4{,}1868\ \text{Ws}$$

Wird die Masse m in g und die Temperatur in K eingesetzt, so erhält man für die Wärmeenergie

$$\triangle W_{th} = c \cdot m \cdot \triangle \vartheta\,. \tag{1.1a}$$

Vollzieht sich die Energieänderung in einem Zeitintervall $\triangle$ t, so ist ein Wärmestrom (Leistung) erforderlich.
Ausgehend von der allgemeinen Beziehung

$$P = \frac{W}{t},$$

gilt dann

$$P_{th} = \frac{\triangle W}{\triangle t} = c \cdot m \cdot \frac{\triangle \vartheta}{\triangle t} . \tag{1.2}$$

Mit den Einheiten aus Formel (1.1a) folgt für den Wärmestrom (Leistung)

$$P_{th} = c \cdot m \cdot \frac{\triangle \vartheta}{\triangle t} . \tag{1.2a}$$

Durch Umrechnung von cal in Ws (1 cal = 4,1868 Ws) erhält man den Wärmestrom P_{th} in der Einheit Watt [W].

1.3. Wärmeabgabe des erwärmten Körpers

1.3.1. Wärmeabgabe durch Leitung

Bei einem Temperaturgefälle in einem festen Körper tritt durch Übertragung der Wärmeenergie ein Wärmestrom P_L in Richtung des Temperaturgefälles auf, der bestrebt ist, das Gefälle zu verringern. Diesen Vorgang nennt man Wärmeleitung [1].
Der Wärmestrom ist proportional der Fläche A, die er durchsetzt, und dem Temperaturgefälle je Längeneinheit.

$$P_L \sim A \frac{\triangle \vartheta}{l}$$

Die Proportionalitätskonstante ist hierbei die Wärmeleitzahl λ.

$$P_L = \frac{\lambda \cdot A}{l} \cdot \triangle \vartheta \tag{1.3}$$

$$P_L = \frac{\lambda \cdot A}{l} (\vartheta_1 - \vartheta_2)$$

Die Wärmeleitzahl λ (auch als spezifisches Wärmeleitvermögen bezeichnet) ist diejenige Wärmemenge, die je Stunde durch eine Wandung von 1 m² Oberfläche und 1 m Dicke geht, wenn beiderseits ein Temperaturunterschied von 1 K herrscht [2].

Die Einheit der Wärmeleitzahl λ ist kcal/mK oder W/mK. Wird die Fläche A in cm², die Länge l in cm und Temperaturdifferenz $\triangle \vartheta$ in K eingesetzt, so ergibt sich für den Wärmestrom

$$P_L = \frac{\lambda \cdot A}{l} \cdot \triangle \vartheta \,. \qquad (1.3a)$$

Man definiert einen Wärmeleitungswiderstand R_{thL} als Quotient von Temperaturunterschied $\triangle \vartheta$ und Wärmestrom P_L (Wärmeleistung).

$$R_{thL} = \frac{\triangle \vartheta}{P_L} \qquad (1.4)$$

$$R_{thL} = \frac{\vartheta_1 - \vartheta_2}{P_L}$$

Für ihn gilt die Dimensionierungsgleichung

$$R_{thL} = \frac{l}{\lambda \cdot A} \,. \qquad (1.5)$$

Werden die Einheiten aus Formel (1.3a) beibehalten, so ergibt sich für den Wärmeleitungswiderstand

$$R_{thL} = \frac{\triangle \vartheta}{P_L} \qquad (1.4a)$$

bzw.

$$R_{thL} = \frac{l}{\lambda \cdot A} \,. \qquad (1.5a)$$

Vergleicht man die Formel (1.4) mit der Definition des elektrischen Widerstandes

$$R = \frac{U}{I},$$

und der Dimensionierungsgleichung

$$R = \frac{l}{\varkappa \cdot A},$$

so ergeben sich zwischen Wärmestrom und elektrischem Strom analoge Beziehungen, wenn man folgende Analogien beachtet:

Wärmestrom	elektrischer Strom
$\triangle \vartheta$	U
P_L	I
λ	$\varkappa$
R_{thL}	R

Beispiel

In ein Aluminiumprofil mit $A = 400\ mm^2$, $l = 160\ mm$ und $\lambda = 2{,}1\ W/K\ cm$ wird Energie eingespeist. In der Fläche, wo man den Wärmestrom zuführt, entsteht die Temperatur $\vartheta_1 = 80\ °C$. Die Temperatur am anderen Ende wird konstant $\vartheta_2 = 30\ °C$ gehalten.

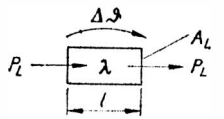


Bild 1.2
Wärmewiderstand

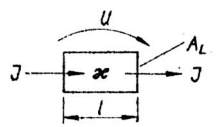


Bild 1.3
Elektrischer Widerstand

Es ist zu berechnen:
1. der Wärmestrom,
2. der Wärmeleitungswiderstand.

Lösung 1:

$$P_L = \frac{\lambda \cdot A}{l} \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2)$$

$$P_L = \frac{2{,}1 \cdot 4}{16} \cdot (90 - 30) = 26{,}3$$

P_L	λ	A	l	$\triangle \vartheta$
W	W/cm K	cm^2	cm	K

Lösung 2:

$$R_{thL} = \frac{\vartheta_1 - \vartheta_2}{P_L} = \frac{80 - 30}{26{,}3} = 1{,}9$$

R_{thL}	$\triangle \vartheta$	P_L
K/W	K	W

oder

$$R_{thL} = \frac{l}{\lambda \cdot A} = \frac{16}{2{,}1 \cdot 4} = 1{,}9$$

R_{thL}	l	A	λ
K/W	cm	cm^2	W/cm K

1.3.2. Wärmeabgabe durch Konvektion

Konvektion ist der Wärmeaustausch zwischen einem bewegten Medium (z. B. umgebende Luft) und einem Körper. Es strömt also nicht die Wärmeenergie selbst, sondern das Medium, das die Energie mit sich führt; daher die Bezeichnung Mit-

führen oder Konvektion (z. B. strömt von einem Ofen erhitzte Luft zur Zimmerdecke) [2].

Strömungen können selbständig durch Dichteunterschiede infolge örtlich verschiedener Temperaturen hervorgerufen werden. Sie lassen sich aber auch durch Gebläse, Pumpen o. ä. erzwingen. Die abgeführte Wärmeleistung (Wärmestrom) P_K ist proportional der Kontaktfläche A_K zwischen beiden Medien (z. B. Oberfläche eines festen Körpers) und dem Temperaturunterschied beider Medien (z. B. Oberflächentemperatur des Körpers und Temperatur der umgebenden Luft).

$$P_K \sim A_K \cdot \triangle \vartheta .$$

Die Proportionalitätskonstante ist hierbei die Wärmeübergangszahl α.

$$P_K = \alpha \cdot A_K \cdot \triangle \vartheta \tag{1.6}$$

$$P_K = \alpha \cdot A_K \cdot (\vartheta_o - \vartheta_u)$$

Die Wärmeübergangszahl α ist in komplizierter Weise abhängig von der *Gestalt der Oberfläche*, der *Geschwindigkeit und Art der Strömung* und vom *strömenden Medium.*

Die Einheit der Wärmeübergangszahl α ist $W/cm^2 \cdot K$.

Wird die Oberfläche A_K in cm^2 und die Temperatur ϑ in K eingesetzt, so erhält man für die Wärmeleistung P_K:

$$P_K = \alpha \cdot A_K \cdot \triangle \vartheta . \tag{1.6a}$$

Auf Grund der Definition des Wärmewiderstandes gilt analog Abschnitt 1.3.1.

$$R_{thK} = \frac{\triangle \vartheta}{P_K} = \frac{\vartheta_o - \vartheta_u}{P_K} \tag{1.7}$$

bzw.

$$R_{thK} = \frac{1}{\alpha \cdot A_K} \tag{1.8}$$

Für die zugeschnittene Größengleichung müssen R_{thK} in

K/W, $\triangle \vartheta$ in K und P_K in W bzw. R_{thK} in K/W, α in W/cm² K und A_K in cm² eingesetzt werden.

Beispiel

Ein Halbleiterbauelement aus Germanium mit $A = 6$ mm², $l = 4$ mm, $\lambda = 0{,}586$ W/cm K sei auf eine metallische Kühlfläche mit $A_K = 300$ cm², $\lambda \to \infty$, die die Wärme durch Konvektion an die Umgebung abgibt, montiert. Die Umgebungstemperatur ist $\vartheta_u = 25$ °C konstant.

Es ist zu berechnen:

1. die maximale vom Halbleiterbauelement als Wärme abgegebene Leistung, wenn die Temperatur an der der Kühlfläche abgewandten Seite des Halbleiterbauelements $\vartheta_j = 70$ °C beträgt und Wärmeübergangswahl α vom Kühlblech zur umgebenden Luft

$$\alpha = 10^{-3} \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{cm^2\,K}}$$

ist;

2. die Oberflächentemperatur der Kühlfläche bei P_{thmax}.

Lösung 1:

Mit Anwendung der Analogien des elektrischen Stromkreises entsteht folgende Reihenschaltung der Wärmewiderstände: Aus dem Maschensatz

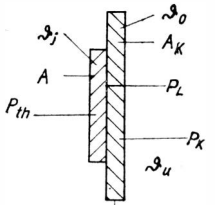


Bild 1.4
Kühlung durch Wärmeleitung und Konvektion [1]

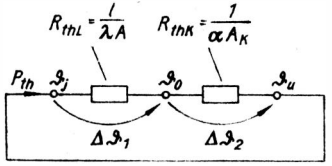


Bild 1.5
Ersatzschaltbild
(Reihenschaltung)
zu Bild 1.4 [1]

$$\Delta\,\vartheta_1 + \Delta\,\vartheta_2 = P_{th}\,(R_{thL} + R_{thK})$$

ergibt sich

$$\Delta\,\vartheta_1 + \Delta\,\vartheta_2 = \vartheta_j - \vartheta_u$$

und somit

$$\vartheta_j - \vartheta_u = P_{th}\,(R_{thL} + R_{thK})$$

bzw.

$$P_{th} = \frac{\vartheta_j - \vartheta_u}{R_{thL} + R_{thK}} = \frac{\vartheta_j - \vartheta_u}{\frac{l}{\lambda A} + \frac{1}{\alpha A_K}}\,.$$

$$P_{thmax} = \frac{70 - 25}{\frac{0{,}4}{0{,}586 \cdot 0{,}36} + \frac{1}{10^{-3} \cdot 300}} = 8{,}6$$

$$P_{thmax} = 8{,}6$$

P_{th}	ϑ_j	ϑ_u	l	λ	A	α	A_K
W	K	K	cm	W/cm K	cm^2	W/cm^2 K	cm^2

Lösung 2:
Aus dem Ersatzschaltbild 1.5 läßt sich

$$R_{thL} = \frac{\Delta\,\vartheta_1}{P_{th}} = \frac{\vartheta_j - \vartheta_o}{P_{th}}$$

ableiten.
Daraus folgt für die Oberflächentemperatur ϑ_o:

$$\vartheta_o = \vartheta_j - P_{thmax} \cdot R_{thL}$$

$$\vartheta_o = \vartheta_j - P_{thmax} \cdot \frac{l}{\lambda A}$$

$$\vartheta_o = 70 - 8{,}6 \frac{0{,}4}{0{,}586 \cdot 0{,}36} = 53{,}7$$

$$\vartheta_o = 53{,}7$$

ϑ_o	ϑ_u	P_{thmax}	l	λ	A
K	K	W	cm	W/cm K	cm^2

1.3.3. Wärmeabgabe durch Strahlung

Wärmeenergie läßt sich auch ohne vermittelndes Medium durch Strahlung übertragen. Damit ist also eine Wärmeabgabe eines Körpers im Vakuum möglich (z. B. Anodensystem in Elektronenröhren [1]).

Ein Körper mit der Oberfläche A, der die absolute Temperatur T aufweist, hat die Strahlungsleistung

$$P_S = \sigma \cdot A \cdot T^4 . \tag{1.9}$$

σ ist die Strahlungskonstante. Sie ist abhängig von der Oberfläche.

Die Einheit der Strahlungskonstante ist $\frac{W}{cm^2 K^4}$.

T ist die Temperatur in K.

Bei $T = 0$ ist $\vartheta = -273$ °C; $T = (273 + \vartheta)$.

In der zugeschnittenen Größengleichung der Strahlungsleistung ist somit P_S in W, σ in $W/cm^2 K^4$, A in cm^2 und T^4 in K^4 einzusetzen.

Beispiel

Ein schwarzer Körper mit $\sigma = 5{,}7 \cdot 10^{-12} \frac{W}{cm^2 K^4}$ hat zur umgebenden Luft eine Wärmeübergangszahl $\alpha = 10^{-3} \frac{W}{cm^2 K}$ bei einer Umgebungstemperatur $\vartheta_u = 18\ °C$ und wird erwärmt.

Es ist zu berechnen:

Ist die Wärmeabgabe durch Strahlung bei einer Oberflächentemperatur $\vartheta_o = 118\ °C$ größer als die durch Konvektion abgegebene Wärmeenergie?

Lösung

Strahlung	Konvektion
$P_S = \sigma \cdot A \cdot T^4$	$P_K = \alpha \cdot A_K \cdot A\ \vartheta$
$\vartheta_o = 118\ °C \triangleq T = 391\ K$	$\triangle\ \vartheta = (\vartheta_o - \vartheta_u) = 100\ K$
$P_S = 5{,}7 \cdot 10^{12} \cdot A \cdot 391^4$	$P_K = 10^{-3}, A_K \cdot 100$
$P_S = 0{,}133\ A$	$P_K = 0{,}1\ A_K$

Da $A = A_K$, folgt $P_S > P_K$.

Bei einer Oberflächentemperatur $\vartheta_o = 118\ °C$ erfolgt die Wärmeabgabe bereits also zum größten Teil durch Strahlung.

1.4. Zeitlicher Temperaturverlauf bei Erwärmung eines Körpers

Man betrachtet dazu einen Körper, dem eine konstante Wärmeleistung P_{thg} zugeführt wird und der an die Umgebung Wärme durch Konvektion abgibt. Der Körper selbst soll überall die gleiche Temperatur aufweisen, die vor der

Wärmezuführung gleich der Umgebungstemperatur ϑ_u ist [1]. Aus Bild 1.1 ergibt sich die Gleichung

gesamte je Zeiteinheit zugeführte Wärmeenergie	=	Erhöhung der Wärmeenergie des Körpers je Zeiteinheit	+	je Zeiteinheit vom Körper an die Umgebung abgegebene Wärmeenergie	= konstant
P_{thg}	=	P_{th}	+	P_K	= konstant

$$P_{thg} = c \cdot m \cdot \frac{d\vartheta}{dt} + \alpha \cdot A_K \cdot \triangle \vartheta \qquad (1.10)$$

$\triangle \vartheta$ ist hierbei der Temperaturunterschied zwischen Körper und Umgebung, d. h., $\triangle \vartheta$ gibt die Übertemperatur des Körpers gegenüber der Umgebung an.

Bild 1.6 stellt die Lösung der Gleichung (1.10) in der Form $\triangle \vartheta = f(t)$ grafisch dar.

Zur Zeit $t = o$ beginnt die Energiezufuhr. Dort ist $\triangle \vartheta = o$, damit ist auch der Anfang der Kurve im Nullpunkt bestimmt. Die Kurve steigt proportional mit der zugeführten Wärmeenergie P_{thg}.

Für $t > o$ ist $\triangle \vartheta > o$, der Körper gibt Wärme ab.

Da die zugeführte Wärmeenergie P_{thg} konstant ist, muß auch die Summe von Wärmeaufnahme des Körpers und Konvektion konstant bleiben. Das Steigungsmaß wird ständig kleiner, und für $t \gg o$ ist schließlich $\frac{d\vartheta}{dt} \approx o$, d. h., die Temperatur

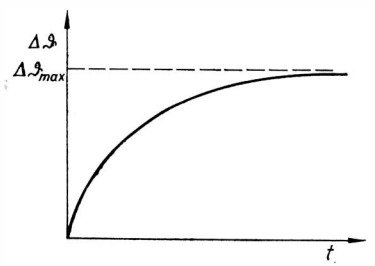


Bild 1.6
Zeitlicher Temperaturverlauf der Erwärmung eines Körpers

ändert sich nicht mehr, der Körper erreicht seine Endtemperatur $\triangle \vartheta_{max}$, es stellt sich ein thermischer Gleichgewichtszustand ein.
Hier gilt dann

$$\Delta \vartheta_{max} = \frac{P_{thg}}{A_K} .$$

Diese maximale Übertemperatur $\Delta\vartheta_{max}$ des Körpers ist also groß, wenn sich die Leistung P_{thg} erhöht und A_K sowie α kleiner werden.
Soll bei einer auftretenden inneren Wärmeleistung bzw. Wärmeaufnahme die Temperatur des Körpers klein bleiben (das ist ja bei Leistungstransistoren der Fall), so müssen α und A_K groß sein. Das erreicht man für α mit künstlicher Kühlung und für A_K mit einer entsprechenden Oberfläche.

2. Thermische Zusammenhänge bei Halbleitern

2.1. Einflüsse auf die Sperrschichttemperatur

Die höchste in einem Transistor vorkommende Temperatur entsteht in der Kollektorsperrschicht, weil diese leistungsmäßig am stärksten belastet wird. Es ist daher notwendig, für jeden Transistor einen maximalen Wert der Sperrschichttemperatur ϑ_{jmax} (Absolutwert) vorzuschreiben.

Sie wird vom Hersteller angegeben und liegt bei *Germaniumtransistoren zwischen 60 und 100 °C* sowie bei *Siliziumtransistoren zwischen 120 und 200* °C.

Die Höhe der sich unter Betriebsbedingungen einstellenden momentanen Sperrschichttemperatur hängt von folgenden Faktoren ab:

- Umgebungstemperatur,
- Wärmeableitungsverhältnisse in und am Bauelement (thermische Nebenbedingung),
- zugeführte elektrische Verlustleistung und ihre Zeitabhängigkeit.

Die Wärmeabfuhrverhältnisse sind hingegen recht kompliziert, weil Leitung, Konvektion und Strahlung zusammenwirken und außerdem die Geometrie des Transistors mit eingeht. Man beschreibt die Wärmeabfuhr daher durchweg an Hand eines Modells und leitet daraus ein thermisches Ersatzschaltbild ab. Wegen der Temperaturabhängigkeit vieler Kennwerte muß die Sperrschichttemperatur unter einem Maximalwert gehalten werden [5].

Für die praktische Beschreibung des thermischen Verhaltens hat es sich als zweckmäßig herausgestellt, die thermischen Eigenschaften durch folgende Größen zu erfassen:

- die maximale Sperrschichttemperatur ϑ_{jmax};
- den Wärmewiderstand R_{th} (thermischer Widerstand);

— eine oder mehrere thermische Zeitkonstanten τ_{th} bzw. Wärmekapazitäten C_{th}, um auch das thermisch-dynamische Verhalten beschreiben zu können.

Die durch Einspeisung eines Leistungsimpulses im Transistor entwickelte Wärmeenergie wird mit Temperaturanstieg zunächst von seiner Wärmekapazität aufgenommen. Erst mit fortschreitender Temperaturerhöhung setzt eine Wärmeableitung in die Umgebung mit der tieferen Temperatur ein. Diese Zeitverzögerung wird global durch ein oder mehrere thermische Zeitkonstanten beschrieben [6].

Führt man der Sperrschicht je Zeiteinheit stets die gleiche Wärmemenge Q zu, so stellt sich in einem Körper ein konstanter Wärmefluß ein, der der zugeführten elektrischen Leistung entspricht.

Die Wärmeabgabe erfolgt bekanntlich durch Leitung, Konvektion und Strahlung. Der Strahlungsanteil des Wärmewiderstandes ist stark temperaturabhängig, da die abgestrahlte Leistung mit der vierten Potenz der absoluten Temperatur anwächst. Wenn der Strahlungsanteil des Wärmewiderstandes dominiert, ist R_{th} ein nichtlinearer Widerstand. Wärmeableitung und Konvektion sind die wesentlichsten Verfahren zur Kühlung.

2.2. Zweiter Durchbruch

Die Wärmeverteilung im Kristall ist bei Belastung nicht gleichmäßig, sondern vom Strom und von der angelegten Spannung abhängig. Die zulässige Verlustleistung nimmt mit steigender Kollektorspannung ab. Bei größeren Kollektorspannungen verändert sich mit steigender Temperatur im Kristall der am Stromfluß beteiligte Querschnitt im Halbleiter, so daß es zu einer Verkleinerung des elektrisch wirksamen Querschnitts und somit zu einer Zunahme des Wärmewiderstandes kommt. Wird dieses durch Aufbau und Größe des Halbleiterbauelements bedingte Verhalten nicht beachtet, so tritt eine starke Stromeinschnürung auf. Sie kann so

stark sein, daß schon bei relativ kleinen Leistungen gegenüber der maximal zulässigen Verlustleistung die Temperaturen im Kristall derart hoch werden, daß dieser lokal aufschmilzt, d. h., der Transistor ist zerstört [13]. Die Wärmekapazität eines solchen Stromkanals ist äußerst gering. Trotz des hohen Wärmewiderstandes entstehen deshalb Zeitkonstanten von $\approx 10^{-7}$ s. Die Sperrspannung bricht auf Grund der plötzlich auftretenden hohen Temperatur zusammen. Man spricht vom Durchbruch „zweiter Art" (second breakdown). Er hängt praktisch nicht von der Temperatur ab.

2.3. Methoden der Wärmeableitung

Für die äußere Wärmeabfuhr von Transistoren sind praktisch 2 Arten zu unterscheiden:

— Bei Transistoren kleiner Verlustleistung ($R_{th} > 15$ K/W) erfolgt die Wärmeabfuhr direkt vom Gehäuse an die umgebende Luft. Für diese Typen wird in Datenblättern der Wärmewiderstand zwischen Sperrschicht und Umgebung angegeben. Der Hersteller mißt dabei den gesamten Wärmewiderstand R_{th}.

$$R_{th} = \frac{\vartheta_j - \vartheta_u}{P_v} \tag{2.1}$$

Eine zusätzliche Wärmeableitung ist mit Kühlschellen möglich. Die damit erreichbaren Verlustleistungen sind in den Datenblättern als Kurven angegeben. Das folgende Bild 2.1 zeigt die gebräuchlichsten Kühlschellen der DDR-Produktion.

— Bei Leistungstransistoren leitet man die Verlustleistung durch besondere Kühlmaßnahmen (Kühlblech, Kühlprofil, Kühlkörper, zusätzliche Konvektion) an die Umgebung ab. Dabei ist es üblich, den Wärmewiderstand in einzelne Komponenten zu zerlegen.

$$P_{vmax} = \frac{\vartheta_{jmax} - \vartheta_{umax}}{\sum R_{th}} \tag{2.2}$$

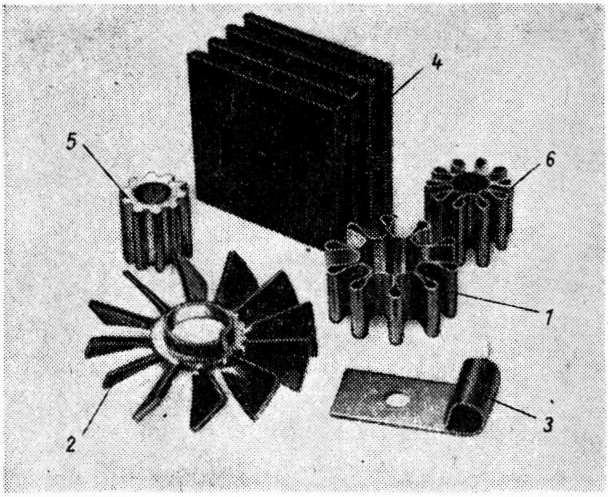


Bild 2.1 Kühlschellen der DDR-Produktion
Für Transistoren der Bauform 5 Kühlschellen 1 und 2
Für Transistoren der Bauform 1 Kühlschellen 3 bis 6

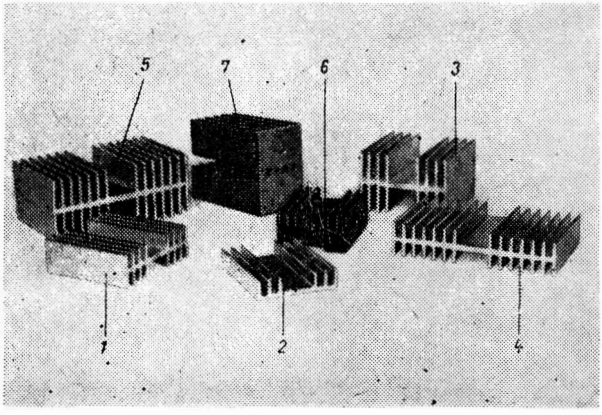


Bild 2.2 Kühlprofile und Kühlkörper der DDR-Produktion
Kühlprofile für Leistungstransistoren 1 bis 5
Kühlkörper für Leistungstransistoren 6 und 7

Für Leistungstransistoren wird vom Hersteller der innere Wärmewiderstand R_{thi} gemessen und in Datenblättern angegeben. Die entsprechenden Größen der Kühlbleche, Kühlprofile bzw. Kühlkörper lassen sich dann errechnen oder durch Diagramme ermitteln.
Das Bild 2.2 zeigt einige typische Kühlprofile und Kühlkörper der DDR-Produktion.

3. Thermische Berechnungen

3.1. Die thermischen Ersatzschaltbilder im statischen Betrieb

3.1.1. Thermisches Ersatzschaltbild eines direkt auf ein Kühlblech montierten Transistors

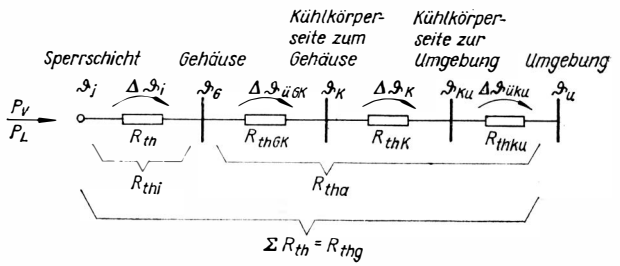
Der thermische Gesamtwiderstand R_{thg} (in der Literatur bzw. in Katalogen auch mit R_{th} oder R_{thja} bezeichnet) ist die Summe der einzelnen thermischen Widerstände. Der thermische Innenwiderstand R_{thi} (in der Literatur bzw. in Katalogen auch mit R_{thj} oder R_{thje} bezeichnet) liegt durch den konstruktiven Aufbau des Transistors innerhalb des Gehäuses fest. Er wird stets vom Hersteller angegeben.

So besagt z. B. $R_{thi} = 1$ K/W, daß die Transistorsperrschicht bei 1 W Verlustleistung um 1 K wärmer als das Transistorgehäuse oder die umgebende Luft ist.

Der thermische Außenwiderstand R_{tha} (in der Literatur oder in Katalogen auch mit R_{the} bezeichnet) liegt zwischen Transistorgehäuseboden und der Umgebung.

Er setzt sich aus dem Wärmeübergangswiderstand zwischen

Bild 1 Thermisches Ersatzschaltbild eines direkt montierten Transistors



Gehäuse und Kühlkörper, dem Wärmewiderstand des Kühlkörpers selbst und dem Wärmeübergangswiderstand zwischen Kühlkörper und Kühlmittel (Umgebung, Luft) zusammen.

Er läßt sich vom Gerätebauer durch Größe, Art und Anordnung der Kühlfläche beeinflussen. Zur genauen Berechnung von R_{tha} wird außer der Größe der Kühlfläche A auch ihre Wärmeübergangszahl α benötigt. Diese ist stark von der Oberflächenbeschaffenheit (blank, geschwärzt, glatt, rauh) abhängig und nur selten exakt festzustellen. Deshalb sind auch die meisten zur Berechnung des Kühlblechwiderstandes R_{thK} verwendeten Formeln für die Praxis ausreichende Näherungslösungen.

Der Wärmeübergangswiderstand zwischen Transistorgehäuse und Kühlkörper R_{thGK} ist abhängig von der Qualität der sich berührenden Flächen. Er wird in der Praxis wegen seiner Geringfügigkeit vernachlässigt.

Der thermische Widerstand des Kühlblechs, Kühlprofils oder Kühlkörpers R_{thK} ist der innere Wärmewiderstand derselben. Er ist zur Berechnung der Kühlfläche, des Kühlprofils bzw. des Kühlkörpers erforderlich. Der Wärmeübergangswiderstand zwischen Kühlkörper und Umgebung R_{thKU} wird in der Praxis ebenfalls vernachlässigt.

Aus dem thermischen Ersatzschaltbild Bild 3.1 lassen sich, ausgehend von der Beziehung

$$R_{th} = \frac{\triangle\ \vartheta}{P_V}\ ,$$

die einzelnen thermischen Widerstände ableiten.
Für die Sperrschichttemperatur gilt

$$\vartheta_j = \sum \triangle\ \vartheta + \vartheta_u\ .$$

Durch die Vernachlässigung von R_{thGK} und R_{thKU} in der Praxis wird $R_{tha} = R_{thK}$ und $\vartheta_G = \vartheta_K$.
Somit gilt für die Sperrschichttemperatur

$$\vartheta_j = P_V\,(R_{thi} + R_{thK}) + \vartheta_u\ . \qquad (3.1)$$

Für direkt auf ein Kühlblech montierte Transistoren entsteht

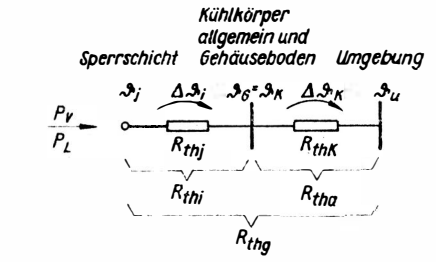


Bild 3.2
Vereinfachtes thermisches Ersatzschaltbild (direkte Montage)

das entsprechende, für die Praxis hinreichend genaue, thermische Ersatzschaltbild.
Für den thermischen Widerstand des Kühlblechs R_{thK} ergibt sich aus Bild (3.2) bzw. Formel (3.1)

$$R_{thK} = \frac{\vartheta_j - \vartheta_u}{P_V} - R_{thi} . \tag{3.2}$$

Beispiel

Ein Leistungstransistor Typ *GD 240*, der direkt auf ein Kühlblech montiert ist, hat die Parameter:

$$R_{thi} = 4\ K/W$$

$$\vartheta_{jmax} = 85\ °C$$

Es ist zu berechnen:

1. die maximale Verlustleistung P_{Vmax} bei einer Gehäusetemperatur von $\vartheta_G = 60\ °C$;
2. die maximale Verlustleistung P_{Vmax} bei einer Umgebungstemperatur $\vartheta_u = 45\ °C$ und einem Kühlblechwärmewiderstand $R_{thK} = 2{,}69\ K/W$.

Lösung 1:

$$R_{thi} = \frac{\vartheta_j - \vartheta_G}{P_V}$$

$$P_{Vmax} = \frac{\vartheta_j - \vartheta_G}{R_{thi}} = \frac{85\ K - 60\ K}{4\ K/W} = 6{,}25\ W$$

Lösung 2:

$$R_{thK} = \frac{\vartheta_j - \vartheta_u}{P_V} - R_{thi}$$

$$P_{Vmax} = \frac{\vartheta_j - \vartheta_u}{R_{thK} + R_{thi}} = \frac{85\ K - 45\ K}{(2{,}69 + 4)\ K/W} = 5{,}98\ W$$

3.1.2. Thermisches Ersatzschaltbild eines isoliert auf ein Kühlblech montierten Transistors

Ist das Transistorgehäuse wie häufig bei Leistungstransistoren mit dem Kollektor galvanisch verbunden und nimmt es dabei ein anderes Potential als das als Kühlblech dienende Chassis an, so ist zwischen Gehäuseboden des Transistors und Chassis eine dünne Isolation erforderlich.

Aus dem Ersatzschaltbild Bild 3.3 lassen sich analog Abschnitt 3.1.1. die thermischen Widerstände und die Sperrschichttemperatur ableiten.

R_{thiso} ist der innere Wärmewiderstand der Isolierscheibe. Er ist vom Isolationsmaterial und der Art der Montage (gefettet, ungefettet) abhängig. Seine Größe ist Tabellen zu entnehmen (Tabellenanhang, Tabelle 3).

Die Wärmeübergangswiderstände zwischen Transistorgehäuseboden und Isolierscheibe R_{thGi} und zwischen Isolierscheibe und Kühlblech R_{thiK} entsprechen prinzipiell dem Wärmeübergangswiderstand R_{thGK} in Bild 3.1. Sie werden in der Praxis vernachlässigt.

Damit ergibt sich für den thermischen Gesamtwiderstand

$$R_{thg} = R_{thi} + R_{thiso} + R_{thK}$$

und für die Sperrschichttemperatur

$$\vartheta_j = \sum \triangle \vartheta + \vartheta_u$$

bzw.

$$\vartheta_j = P_V (R_{thi} + R_{thiso} + R_{thK}) + \vartheta_u . \qquad (3.3)$$

Für isoliert auf ein Kühlblech montierte Transistoren ent-

steht somit das folgende, für die Praxis hinreichend genaue, thermische Ersatzschaltbild.

Stellt man die Formel (3.3) um, so ergibt sich dann der Wärmewiderstand des Kühlblechs R_{thK} für isolierte Montage zu

$$R_{thK} = \frac{\vartheta_j - \vartheta_u}{P_V} - R_{thi} - R_{thiso} . \tag{3.4}$$

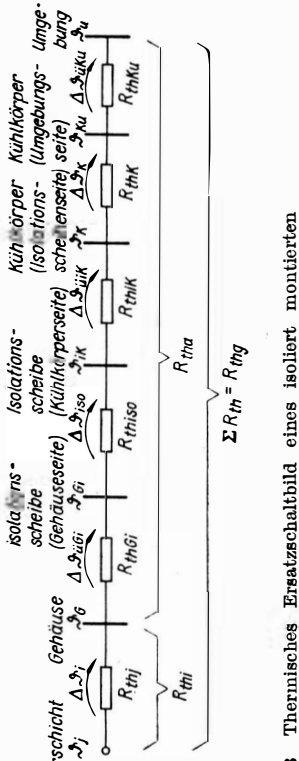


Bild 3.3 Thermisches Ersatzschaltbild eines isoliert montierten Transistors

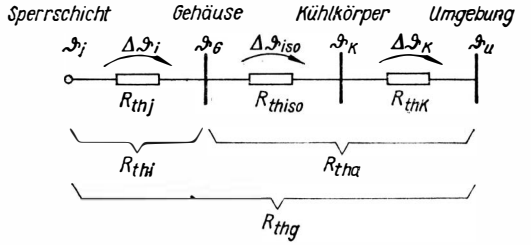


Bild 3.4 Vereinfachtes thermisches Ersatzschaltbild (isolierte Montage)

Ist $R_{thg} - R_{thi} \gg R_{thiso}$, so läßt sich unter Umständen in der Praxis der Wärmewiderstand der Isolation vernachlässigen. Diesen Zustand erhält man meist dann, wenn Leistungstransistoren nur mit einem Teil ihrer Verlustleistung betrieben werden. Ist der Kühlblechwiderstand R_{thK} sehr klein und zwangsläufig damit die Kühlblechfläche sehr groß, so empfiehlt es sich, den Transistor direkt zu montieren und dafür das Kühlblech isoliert aufzusetzen.

Beispiel

Ein Leistungstransistor *OC 26* wird isoliert auf ein Kühlblech montiert.

Folgende Parameter sind gegeben:

$\vartheta_{jmax} = 90\ °C$
$R_{thi} = 1{,}2\ K/W$
$\vartheta_u = 45\ °C$
$P_V = 10\ W$
$R_{thiso} = 0{,}5\ K/W$

Es ist zu berechnen:

1. die Temperatur am Transistorgehäuse ϑ_G,
2. die Kühlblechtemperatur ϑ_K,
3. der Kühlblechwärmewiderstand R_{thK}.

Lösung 1:

$$R_{thi} = \frac{\vartheta_j - \vartheta_G}{P_V}$$

$$\vartheta_G = \vartheta_j - P_V \cdot R_{thi}$$

$$\vartheta_G = 90\ °C - 10\ W \cdot 1{,}2\ °C/W = 78\ °C$$

Lösung 2:

$$R_{thiso} = \frac{\vartheta_G - \vartheta_K}{P_V}$$

$$\vartheta_K = \vartheta_G - P_V \cdot R_{thiso}$$

$$\vartheta_K = 78\ °C - 10\ W \cdot 0{,}5\ °C/W = 73\ °C$$

Lösung 3:

$$R_{thK} = \frac{\vartheta_j - \vartheta_u}{P_V} - R_{thi} - R_{thiso}$$

$$R_{thK} = \frac{90\ K - 45\ K}{10\ W} - 1{,}2\ K/W - 0{,}5\ K/W$$

$$= 2{,}8\ K/W$$

3.2. Analoge Beziehungen der thermischen Ersatzschaltbilder

Zwischen dem Temperaturgefälle $\vartheta_j - \vartheta_u$ und dem Wärmewiderstand R_{th} sowie der Verlustleistung P_V besteht ein dem Ohmschen Gesetz $U = I \cdot R$ analoges Gesetz:

$$\triangle\, \vartheta = \vartheta_j - \vartheta_u = P_V \cdot R_{thg}$$

oder

$$\vartheta_j - \vartheta_u = P_V\,(R_{thi} + R_{tha}) \qquad (3.5)$$

Es läßt sich unterteilen in

$$\vartheta_j - \vartheta_G = P_V \cdot R_{thi} \text{ und } \vartheta_G - \vartheta_u = P_V \cdot R_{tha}.$$

Hinsichtlich der einzelnen Temperaturgefälle kann man auch ähnlich der gewöhnlichen Spannungsteilerregel ansetzen:

$$\frac{\vartheta_j - \vartheta_G}{\vartheta_G - \vartheta_u} = \frac{R_{thi}}{R_{tha}} \tag{3.6}$$

Beispiel

Ein direkt auf ein Kühlblech montierter Transistor Typ *GD 170* hat die Parameter

$$R_{thi} = 7{,}5\ \text{K/W},$$
$$\vartheta_j = 75\ ^\circ\text{C},$$
$$R_{thK} = 2{,}5\ \text{K/W},$$
$$\vartheta_u = 40\ ^\circ\text{C}.$$

Wie groß ist seine Gehäusetemperatur ϑ_G?

$$\frac{\vartheta_j - \vartheta_G}{\vartheta_G - \vartheta_u} = \frac{R_{thi}}{R_{tha}}$$

$$R_{tha} \triangleq R_{thK}$$

$$\vartheta_G = \frac{R_{tha} \cdot \vartheta_j + R_{thi} \cdot \vartheta_u}{R_{thi} + R_{tha}}$$

$$\vartheta_G = \frac{2{,}5\ ^\circ\text{C/W} \cdot 75\ ^\circ\text{C} + 7{,}5\ ^\circ\text{C/W} \cdot 40\ ^\circ\text{C}}{7{,}5\ ^\circ\text{C/W} + 2{,}5\ ^\circ\text{C/W}} = 48{,}75\ ^\circ\text{C}$$

4. Ermittlung der Daten von Kühlblechen, Kühlprofilen und Kühlkörpern

4.1. Ermittlung der Größen von Kühlblechen

4.1.1. Berechnung von Kühlblechen mit Formeln

Der Wärmewiderstand R_{thK} eines Kühlblechs wird nach folgender in der Praxis ausreichenden Näherungsformel (nicht für Kühlkörper gültig) berechnet [13]:

$$R_{thK} = \frac{3{,}3}{\sqrt{\lambda\, d}} \cdot C^{0{,}25} + \frac{650}{A} C \tag{4.1}$$

In dieser Gleichung bedeuten:

R_{thK} Wärmewiderstand des Kühlblechs in K/W
λ Wärmeleitwert des Kühlblechs in W/K cm
d Dicke des Kühlblechs in mm
A Fläche des Kühlblechs in cm^2
C Korrekturfaktor für die Lage und Oberflächenbeschaffenheit des Kühlblechs

Diese Näherungsformel gilt für annähernd quadratisch geformte Kühlbleche, und wenn der Halbleiter, in der Mitte des Kühlblechs montiert, die einzige Wärmequelle ist. Die Werte für λ und C gelten in ruhender Luft bis zu einer Umgebungstemperatur ϑ_u von ≈ 45 °C, wenn keine heißen, wärmestrahlenden Teile in der Nähe sind.

Zur Berechnung der Kühlblechflächen wird die Formel (4.1) in die Form

$$A = \frac{650 \cdot C}{R_{thK} - \frac{3{,}3 \sqrt[4]{C}}{\sqrt{\lambda d}}} \tag{4.2}$$

umgestellt.

Aus der Formel (4.2) nimmt man den Term

$$\frac{3{,}3 \cdot \sqrt[4]{\zeta}}{\sqrt{\lambda d}}$$

heraus, bezeichnet ihn als Faktor K und versieht diesen mit den Indizes für die Lage sowie die Oberflächenbeschaffenheit des Kühlblechs. Wird für die K-Faktoren eine Tabelle (Anhang, Tabelle 5) aufgestellt, dann erhält man die folgenden vereinfachten Näherungsformeln als zugeschnittene Größengleichungen für die Kühlblechflächen (A immer in cm^2 und R_{thK} in K/W).

Kühlblech blank, senkrechte Lage:

$$A = \frac{552{,}5}{R_{thK} - K_{bs}} \tag{4.3}$$

Kühlblech geschwärzt, senkrechte Lage:

$$A = \frac{279{,}5}{R_{thK} - K_{gs}} \tag{4.4}$$

Kühlblech blank, waagerechte Lage:

$$A = \frac{650}{R_{thK} - K_{bw}} \tag{4.5}$$

Kühlblech geschwärzt, waagerechte Lage:

$$A = \frac{325}{R_{thK} - K_{gw}} \tag{4.6}$$

Beispiel

Ein Leistungstransistor *GD 240* arbeitet mit folgenden Parametern:

$\vartheta_j = 85\ °C$
$R_{thi} = 4\ K/W$
$\vartheta_u = 40\ °C$
$-I_C = 1\ A$
$-U_{CE} = 6\ V$

Es ist die Kühlblechfläche für direkte Montage zu berechnen. Material 3 mm Alu. Oberfläche blank, senkrechte Lage.

Lösung:
Aus Anhang, Tabelle 5 $K_{bs} = 1{,}27$

$$P_V = I_C \cdot U_{CE} = 1\,A \cdot 6\,V = 6\,W$$

$$R_{thK} = \frac{\vartheta_j - \vartheta_u}{P_V} - R_{thi}$$

$$R_{thK} = \frac{85\,K - 40\,K}{6\,W} - 4\,K/W = 3{,}5\,K/W$$

$$A = \frac{552{,}5}{R_{thK} - K_{bs}} = \frac{552{,}5}{3{,}5 - 1{,}27} = 247{,}7$$

$$A \approx 248\,cm^2$$

Beispiel
Ein Leistungstransistor *7 NU 74* mit den Parametern

$\vartheta_j = 100\,°C$
$R_{thi} = 1{,}2\,K/W$
$\vartheta_u = 40\,°C$
$-I_C = 5\,A$
$-U_{CE} = 3\,V$

soll isoliert auf ein Kühlblech montiert werden.
Das Material des Kühlblechs ist 5 mm Kupfer.
Lage und Beschaffenheit des Kühlblechs: geschwärzt, waagerecht. Material der Isolierscheibe: Glimmer 100 μm, beiderseitig gefettet.
Es ist die erforderliche Kühlblechfläche zu berechnen.

Lösung:
Aus Anhang, Tabelle 6.5 $K_{gw} = 0{,}64$
Aus Anhang, Tabelle 6.3 $R_{thiso} = 0{,}7\,°C/W$

$$P_V = I_C \cdot U_{CE} = 5\,A \cdot 3\,V = 15\,W$$

$$R_{thK} = \frac{\vartheta_j - \vartheta_u}{P_V} - R_{thi} - R_{thiso}$$

$$R_{thK} = \frac{100\ K - 40\ K}{15\ W} - 1{,}2\ K/W - 0{,}7\ K/W$$
$$= 2{,}1\ K/W$$

$$A = \frac{325}{R_{thK} - K_{gw}} = \frac{325}{2{,}1 - 0{,}64} = 222{,}6$$

$$A \approx 223\ cm^2$$

Beispiel

Auf ein vorhandenes Chassis aus 2 mm kadmiertem Stahlblech soll an der senkrechten Seitenfläche, die 50 cm² ist, ein Leistungstransistor *ASZ 1015* isoliert montiert werden.

$\vartheta_j = 90\ °C$
$R_{thi} = 2\ K/W$

Als Isolierscheibe dient eine beiderseitig gefettete Glimmerscheibe von 50 μm Dicke.

Welche Leistung darf der Transistor bei $\vartheta_u = 35\ °C$ in Wärme umsetzen?

Lösung:

$$R_{thK} = \frac{3{,}3}{\sqrt{\lambda \cdot d}} \cdot C^{0{,}25} + \frac{650}{A} \cdot C$$

$$R_{thK} = \frac{3{,}3}{\sqrt{0{,}46 \cdot 2}} \cdot \sqrt[4]{0{,}85} + \frac{650 \cdot 0{,}85}{50} = 14{,}3$$

R_{thK}	λ	d	A
K/W	W/K cm	mm	cm²

Die einzusetzenden Werte entnimmt man dem Tabellenanhang:

Aus Tabelle 6.1 C = 0,85
Aus Tabelle 6.2 λ = 0,46
Aus Tabelle 6.3 $R_{thiso} = 0{,}5$

$$R_{thK} = \frac{\vartheta_j - \vartheta_u}{P_V} - R_{thi} - R_{thiso}$$

$$P_V = \frac{\vartheta_j - \vartheta_u}{R_{thK} + R_{thi} + R_{thiso}} = \frac{90\,K - 35\,K}{(14{,}3 + 2 + 0{,}5)\,K/W}$$
$$= 3{,}27\,W$$

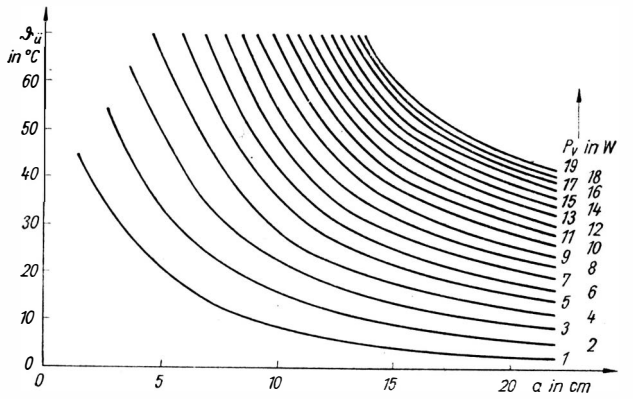
4.1.2. Auswahl von Kühlblechen aus Kurven

Ein weiteres Verfahren zur Ermittlung der Kühlfläche ist die Auswahl aus Kurven.

Das Bild 4.1 zeigt aus Formeln abgeleitete Kurvenscharen, die Näherungslösungen darstellen. In diesem Diagramm ist die Übertemperatur des Transistorgehäuses ϑ_u in Abhängigkeit von der Kühlblechgröße mit der Verlustleistung als Parameter dargestellt. Die Auswahl der Kühlblechfläche aus dem Diagramm hat den Vorteil, daß bereits nach einem Rechengang (Berechnung von $\vartheta_ü$) die Kühlblechfläche ausgewählt werden kann.

Gegenüber der Berechnung nach Formeln [Formel (4.3) bis (4.6)] gibt es allerdings eine Reihe von Nachteilen. Die An-

Bild 4.1 Übertemperatur des Transistorgehäuses in Abhängigkeit von der Kühlblechgröße
Parameter: Verlustleistung



wendung des Diagramms Bild 4.1 hat folgende Vorteile:

— Die Kühlblechauswahl ist relativ einfach.
— Es werden nur 2 Parameter, die Übertemperatur ϑ_u und die Verlustleistung P_V, benötigt.
— Das Kühlblech ist nach der Auswahl als Kantenlänge a gegeben.

Demgegenüber stehen folgende Nachteile:

Die Kurven gelten

— nur für Aluminiumblech mit einer Stärke von 2 ... 3 mm; dadurch sind auch die Toleranzen größer als bei Berechnung mit Formeln;
— nur für blanke Oberfläche und senkrechte Lage;
— nur für Verlustleistungen bis $P_V = 19$ W.

Liegt das berechnete $\vartheta_ü$ in der Nähe des $\vartheta_ü$, bei dem die Parameterkurve P_V beginnt, so ist eine Auswahl nicht möglich; z. B. $\vartheta_ü = 10$ °C, $P_V = 4$ W: Auswahl unmöglich, da $P_V = 4$ W erst bei $\vartheta_ü = 12$ °C beginnt.

Für die Auswahl des Kühlblechs gilt auch bei Kurven:

— Das Kühlblech muß quadratisch sein.
— Der Transistor muß, in der Mitte montiert, die einzige Wärmequelle darstellen.
— Die Umgebungstemperatur darf bis $\vartheta_ü = 45$ °C betragen.
— Es dürfen keine anderen heißen, wärmestrahlenden Teile in der Nähe sein.

Die Übertemperatur am Transistorgehäuse $\vartheta_ü$, die bei der Kühlblechauswahl nach Diagramm Bild 4.1 benötigt wird, läßt sich aus Bild 3.2 bzw. Bild 3.4 ableiten.

$$\vartheta_ü = \vartheta_K - \vartheta_u = P_V \cdot R_{tha}$$

Setzt man R_{tha} in die Formeln (3.2) und (3.4), so ergibt sich:

$$\vartheta_ü = \vartheta_j - \vartheta_u - P_V \cdot R_{thi} \qquad \text{für direkte Montage}$$

$$\vartheta_ü = \vartheta_j - \vartheta_u - P_V (R_{thi} + R_{thiso})$$

für isolierte Montage.

Die Berechnung des ersten Beispiels in Abschnitt 4.1.1. ergab:

$$3\text{ mm Al} \quad A = 248\text{ cm}^2 \quad a = 15{,}7\text{ cm}$$

Die Auswahl der Kühlblechfläche nach Diagramm Bild 4.1 ergibt:

$$\vartheta_{ü} = \vartheta_j - \vartheta_u - P_V \cdot R_{thi} =$$

$$\vartheta_{ü} = 85\ °C - 40\ °C - 6\ W \cdot 4\ °C/W = 21\ °C$$

$$\vartheta_{ü} = 21\ °C$$

$$\rightarrow a = 17{,}1\ cm \quad A = 292\ cm^2$$

$$P_V = 6\ W$$

Beispiel

Ein Leistungstransistor *GD 240* arbeitet mit folgenden Parametern (Transistor isoliert auf das Kühlblech montiert):

$$\vartheta_j = 85\ °C$$

$$\vartheta_u = 45\ °C$$

$$R_{thi} = 4\ K/W$$

$$P_V = 3\ W$$

Isolierscheibe: Glimmer 100 μm, beiderseitig gefettet, mit $R_{thiso} = 0{,}7$ K/W.

Es ist die Kühlblechfläche nach Diagramm Bild 4.1 auszuwählen.

$$\vartheta_{ü} = \vartheta_j - \vartheta_u - P_V\,(R_{thi} + R_{thiso}),$$

$$\vartheta_{ü} = 85\ °C - 45\ °V - 3\ W\ (4\ °C/W + 0{,}7\ °C/W)$$
$$= 25{,}9\ °C$$

$$\vartheta_{ü} = 25{,}9\ °C$$

$$\rightarrow a = 8{,}8\ cm \quad A = 77\ cm^2$$

$$P_V = 3\ W$$

Die Berechnung nach Formel (4.3) ergäbe:

2 mm Al $\quad A \approx 78\ cm^2 \quad a = 8{,}9\ cm$

3 mm Al $\quad A \approx 75\ cm^2 \quad a = 8{,}7\ cm$

Die Beispiele zeigen, daß die Auswahl der Kühlblechfläche nach Diagramm 4.1 hinreichend genau ist und in den angegebenen Grenzen den Anforderungen der Praxis genügt.

4.2. Berechnung von Kühlprofilen

4.2.1. Auswahl nach Diagramm

Der Einsatz von Kühlprofilen hat gegenüber Kühlblechen folgende Vorteile:

— Die Wärmeabführung ist bei freier Konvektion und bei Zwangskühlung besser, da die Profilanordnung eine Kaminwirkung begünstigt.
— Bei gleichem Platzbedarf in Geräten sind mit Kühlprofilen größere Leistungen realisierbar.
— Es werden Verlustleistungen möglich, die sich mit Kühlblechen nur theoretisch erreichen lassen.
— Die Berechnung bzw. Auswahl der Kühlprofile ist relativ einfach, es werden stets nur 2 Parameter benötigt.

In diesem Abschnitt sind 5 Kühlprofile vorgestellt. Die Kühlprofile bestehen aus einer Legierung (Aluminium-Magnesium-Silizium) mit naturfarbener Oberfläche, anodisch oxydiert, kalt ausgelagert. Hersteller ist der *VEB Vereinigte NE-Metall-Halbzeugwerke* Hettstedt, *Leichtmetallwerk* Rackwitz.

Die Berechnung bzw. Auswahl wird nach vom Hersteller gelieferten Diagrammen vorgenommen, die unter folgenden Bedingungen gelten:

— freie Konvektion,
— Kühlprofil in Strömungsrichtung 90 mm lang.

Im Diagramm Bild 4.3 ist die Übertemperatur des Transistorgehäuses $\vartheta_{ü}$ in Abhängigkeit von der Verlustleistung P_V mit den Kühlprofilen als Parameter und im Diagramm Bild 4.4 der Wärmewiderstand des Kühlprofils R_{thK} in Abhängigkeit von der Verlustleistung P_V mit den Kühlprofilen als Parameter dargestellt.

Zur Kühlprofilauswahl werden stets 2 Parameter benötigt:

— für Diagramm Bild 4.3: die Übertemperatur $\vartheta_{ü}$
  die Verlustleistung P_V
— für Diagramm Bild 4.4: der Wärmewiderstand R_{thK}
  die Verlustleistung P_V

Die Abmessungen und die Formen der Kühlprofile zeigt das folgende Bild.

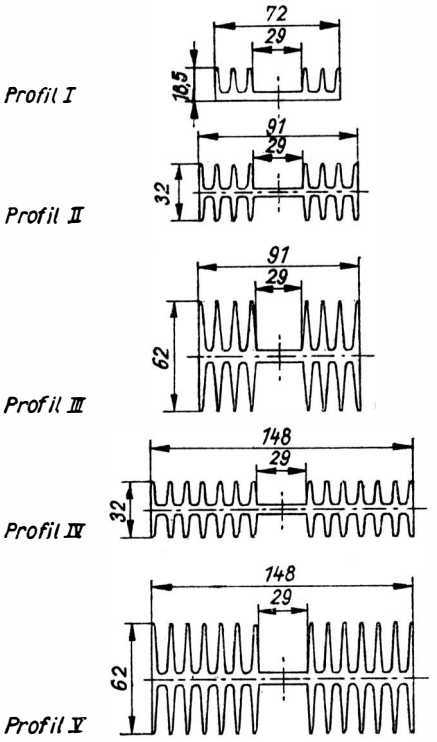


Bild 4.2 Formen und Abmaße der Kühlprofile I bis V [12]

Die Berechnung bzw. Auswahl der Kühlprofile wird nach den Diagrammen Bild 4.3 und Bild 4.4 vorgenommen.

Beispiel
Ein Leistungstransistor *KT 902 A* arbeitet mit folgenden Parametern:

$$\vartheta_j = 150\ °C$$
$$\vartheta_u = 45\ °C$$

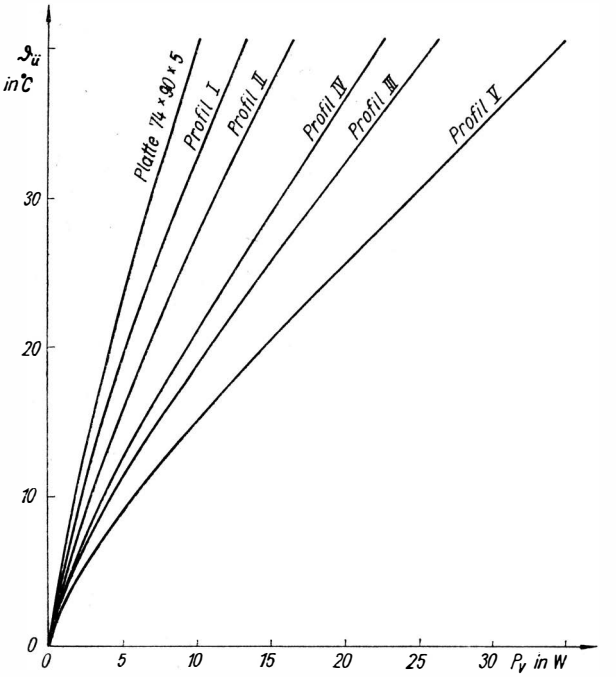


Bild 4.3 Übertemperatur des Transistorgehäuses in Abhängigkeit von der Verlustleistung
Parameter: Kühlprofile [12]

$R_{thi} = 3{,}3$ K/W
$P_V = 20$ W

Es ist das Kühlprofil für den
a) direkt montierten Transistor sowie
b) für den isoliert montierten Transistor
zu bestimmen.
— Isolierscheibe: Glimmer 50 μm, gefettet mit $R_{thiso} = 0{,}5$ K/W.

Lösung:

a) Transistor direkt montiert nach Diagramm Bild 4.3

$$\vartheta_{ü} = \vartheta_j - \vartheta_u - P_V \cdot R_{thi},$$

$$\vartheta_{ü} = 150\ °C - 45\ °C - 20\ W \cdot 3{,}3\ °C/W = 39\ °C$$

$$\vartheta_{ü} = 39\ °C$$

$$\rightarrow \text{Profil IV}$$

$$P_V = 20\ W$$

Nach Diagramm Bild 4.4 ist:

$$R_{thK} = \frac{\vartheta_j - \vartheta_u}{P_V} - R_{thi},$$

$$R_{thK} = \frac{150\ K - 45\ K}{20\ W} - 3{,}3\ K/W = 1{,}95\ K/W,$$

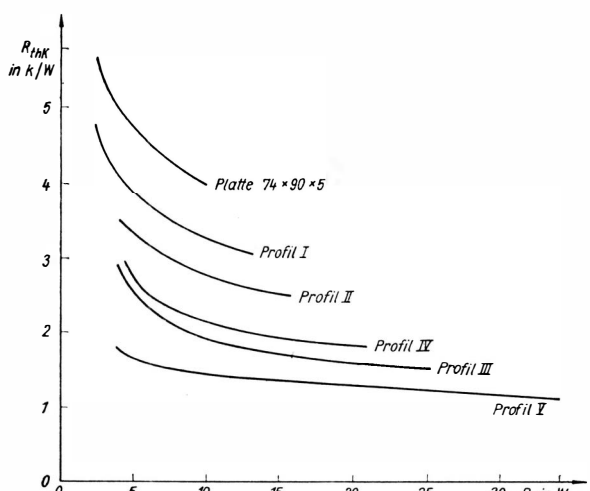


Bild 4.4 Wärmewiderstand in Abhängigkeit von der Verlustleistung
Parameter: Kühlprofile [12]

$R_{thK} = 1{,}95$ K/W

→ Profil IV

$P_V = 20$ W

b) Transistor isoliert montiert nach Diagramm Bild 4.3

$$\vartheta_{ü} = \vartheta_j - \vartheta_u - P_V (R_{thi} + R_{thiso}),$$

$$\vartheta_{ü} = 150\ °C - 45\ °C - 20\ W\ (3{,}3\ °C/W + 0{,}5\ °C/W)$$
$$= 29\ °C$$

$\vartheta_{ü} = 29$ °C

→ Profil V

$P_V = 20$ W

Nach Diagramm Bild 4.4 ist:

$$R_{thK} = \frac{\vartheta_j - \vartheta_u}{P_V} - R_{thi} - R_{thiso},$$

$$R_{thK} = \frac{150\ K - 45\ K}{20\ W} - 3{,}3\ K/W - 0{,}5\ K/W$$
$$= 1{,}45\ K/W,$$

$R_{thK} = 1{,}45$ K/W

→ Profil V

$P_V = 20$ W

Wo sich die direkte und die isolierte Montage um eine Profilgröße unterscheiden, sollte man untersuchen, ob es gerätetechnisch günstiger ist, die direkte Montage mit dem kleineren Kühlprofil zu wählen und dafür das Kühlprofil isoliert zu montieren.

Beispiel

Ein Leistungstransistor *GD 240* soll mit folgenden Parametern betrieben werden:

$\vartheta_j = 85$ °C
$\vartheta_u = 45$ °C
$R_{thi} = 4$ K/W

Zur Verfügung steht Kühlprofil I.
Welche Verlustleistung P_V darf der Transistor in Wärme umsetzen?

Lösung:

Aus dem Diagramm Bild 4.4 kann für Profil I entnommen werden $R_{thK} \approx 3{,}2$ K/W.

$$R_{thK} = \frac{\vartheta_j - \vartheta_u}{P_V} - R_{thi}$$

Die Umstellung der Formel nach der Verlustleistung P_V ergibt sich zu:

$$P_V = \frac{\vartheta_j - \vartheta_u}{R_{thK} + R_{thi}}.$$

Die maximal zulässige Verlustleistung des *GD 240* mit Kühlprofil I ist dann:

$$P_V = \frac{\vartheta_j - \vartheta_u}{R_{thK} + R_{thi}} = \frac{85\text{ K} - 45\text{ K}}{3{,}2\text{ K/W} + 4\text{ K/W}} = 5{,}5\text{ W}.$$

4.2.2. Kühlprofilauswahl mit Erwärmungskurven

Die Diagramme Bild 4.3 und Bild 4.4 gelten für 90 mm lange Kühlprofile und sind demzufolge nur begrenzt anwendbar.

In der Praxis werden auch Parameter gefordert, die außerhalb der Diagramme liegen. Sie ließen sich mit Profil V und Zwangskühlung erreichen. Was aber tun, wenn der Einsatz einer Zwangskühlung nicht möglich ist?

Ausgehend von diesen Fakten sei eine Methode aufgezeigt, die eine Realisierung von Parametern, die außerhalb der Diagramme liegen, ermöglicht.

— Es wird ein Kühlprofil mit größerer Profillänge ausgewählt.
— Auf dieses wird der Transistor montiert, mit seiner geforderten Verlustleistung betrieben und die Erwärmungskurve aufgenommen.

— Vor der Aufnahme der Erwärmungskurve ist die zulässige Temperatur des Kühlprofils $\vartheta_{K\,zul}$ zu berechnen.

Aus den mathematischen Ableitungen des thermischen Ersatzschaltbildes nach Abschnitt 3.1.1. geht hervor:

$$R_{thi} = \frac{\vartheta_j - \vartheta_G}{P_V} \rightsquigarrow \vartheta_j = \vartheta_G + P_V \cdot R_{thi}$$

Bei direkter Montage ist die Gehäusetemperatur des Transistors ϑ_G gleich der Kühlprofiltemperatur ϑ_K; und die Sperrschichttemperatur

$$\vartheta_j = \vartheta_K + P_V \cdot R_{th}\,.$$

Die zulässige Kühlprofiltemperatur $\vartheta_{K\,zul}$ ist dann

$$\vartheta_{K\,zul} = \vartheta_{j\,max} - P_V \cdot R_{thi}\,. \tag{4.7}$$

Erreicht die Erwärmungskurve also ihren Endwert ϑ unterhalb der zulässigen Kühlprofiltemperatur, so wird auch die Sperrschichttemperatur nicht überschritten und die Bedingung $\vartheta_{j\,vorh} < \vartheta_{j\,max}$ erfüllt.

Wird bei Aufnahme der Erwärmungskurve die zulässige Kühlprofiltemperatur erreicht, ohne daß die Erwärmungskurve ihren Endwert erreicht hat, so ist die Meßreihe abzubrechen und mit größerer Profillänge zu wiederholen, bis $\vartheta_{j\,vorh} < \vartheta_{j\,max}$ ist.

Diese Betrachtungen gelten analog für einen isoliert auf das Kühlprofil montierten Transistor.

Hier ist die zulässige Kühlprofiltemperatur

$$\vartheta_{K\,zul} = \vartheta_{j\,max} - P_V\,(R_{thi} + R_{thiso})\,. \tag{4.8}$$

Hinweis

Bei der Aufnahme der Erwärmungskurve muß die Temperaturdifferenz $\Delta\,\vartheta u$ zwischen der bei der Messung tatsächlich vorhandenen Umgebungstemperatur ϑu_{vorh} und der Umgebungstemperatur ϑu der Aufgabenstellung beachtet werden.

$$\Delta\,\vartheta_u = \vartheta_u - \vartheta_{u\,vorh}$$

Beispiel

Ein Leistungstransistor *7 NU 74* arbeitet mit folgenden Parametern:

$\vartheta_j = 100\ °C$ $\quad R_{thi} = 1{,}2\ K/W$

$\vartheta_u = 45\ °C$ $\quad P_V = 25\ W$

Wie können diese Parameter mit Kühlprofil realisiert werden? Die Auswahl eines Kühlprofils nach Diagramm Bild 4.3 und Bild 4.4 bringt keine Lösung, da die Schnittpunkte

$\vartheta_{ü} = 25\ °C$ bzw. $R_{th\ KP} = 1\ K/W$

$P_V = 25\ W$ $\quad P_V = 25\ W$

außerhalb der Kurvenscharen liegen. Das Kühlprofil wird deshalb 200 mm lang gewählt und die Erwärmungskurve bei $\vartheta_{u\ vorh} = 25°C$ aufgenommen.

Die maximal als Meßwert zulässige Kühlprofiltemperatur ist dann

$$\vartheta_{K\ zul} = \vartheta_j - P_V \cdot R_{thi} - \Delta\vartheta_u = 100\ °C - 25\ W \cdot 1{,}2\ °C/W - 20\ °C = 50\ °C.$$

Die aufgenommene Erwärmungskurve erreichte bei $\vartheta_{K\ gem} = 45\ °C$ ihren Endwert.

Die tatsächliche auf die maximale zulässige Umgebungstemperatur $\vartheta_u = 45\ °C$ bezogene Sperrschichttemperatur $\vartheta_{j\ vorh}$ ist somit

$$\vartheta_{j\ vorh} = \vartheta_{K\ gem} + \triangle\ \vartheta_u + P_V \cdot R_{thi},$$

$$\vartheta_{j\ vorh} = 45\ °C + 20\ °C + 25\ W \cdot 1{,}2\ °C/W = 95\ °C.$$

Die Bedingung

$$\vartheta_{j\ vorh} < \vartheta_{j\ max}\ (95\ °C < 100\ °C)$$

ist somit erfüllt.

Die Auswahl der Kühlprofillänge ist auch nach den Diagrammen 8a bis 8c in Heft 22/1976, S. 721 der radio-fernsehen-elektronik gut möglich.

4.2.3. Zwangskühlung von Kühlprofilen

Der Anwender ist oft gezwungen, genormte Abmaße der Kühlprofile einzuhalten, und muß, um die geforderten Parameter zu erzielen, zwangskühlen.
Der Wärmewiderstand eines Kühlprofils (auch Kühlbleches oder Kühlkörpers) nimmt mit zunehmender Kühlluftgeschwindigkeit ab.
Diese Diagramme werden vom Hersteller angegeben.
Bei entsprechendem Aufwand an Kühlung sind Wärmewiderstände $< 0{,}1$ K/W erreichbar.
Es sollte aber grundsätzlich untersucht werden, ob der Aufwand für die Kühlung, z. B.

- Anzahl der Lüfter,
- Leistung der Lüfter,
- Platzbedarf,
- evtl. zusätzliche elektrische Entstörung,
- Anordnung von Luftschächten,
- zusätzliche Temperaturregelschaltung,

den erwünschten Nutzen bringt und gerechtfertigt ist oder ob durch solche Möglichkeiten wie

- Parallelschalten von Transistoren,
- Wahl günstigerer Transistoren; z. B. Siliziumtypen oder eines Typs mit geringerem Wärmewiderstand,
- Einsatz von Kühlkörpern mit kleinerem Wärmewiderstand,
- Änderung der Oberfläche des Kühlprofils, z. B. Schwärzen,

eine effektivere Lösung erzielt werden kann.

Ist der Einsatz einer Zwangskühlung erforderlich, so erfolgt die Auswahl der Belüftung nach Diagrammen. Zuerst wird mit Formel (3.2) bzw. Formel (3.4) der erforderliche Wärmewiderstand $R_{th\,K}$ errechnet. Mit dem errechneten Wärmewiderstand $R_{th\,K}$ ist aus einem zum vorgegebenen Kühlprofil analog dem Bild 4.6 gehörenden Diagramm die erforderliche Kühlluftgeschwindigkeit zu ermitteln. Mit der Kühlluftgeschwindigkeit V_L werden die entsprechenden Lüfter gewählt.

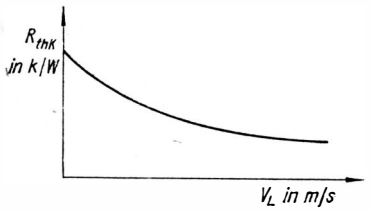


Bild 4.5
Wärmewiderstand in Abhängigkeit von der Kühlluftgeschwindigkeit

In der Praxis kommt es oft vor, daß dem Anwender (besonders Amateuren) weder die Diagramme der Abhängigkeit des Wärmewiderstandes von der Kühlluftgeschwindigkeit zur Verfügung stehen, noch die Kühlluftgeschwindigkeit der Lüfter bekannt ist.
In diesem Falle sollte man wie folgt verfahren:

— Das Kühlprofil wird entsprechend den Forderungen ausgewählt und der Transistor montiert.
— Aus dem Diagramm Bild 4.4 wird der Wärmewiderstand $R_{th\,K}$ des gewählten Kühlprofils ermittelt.
— Mit Formel (3.1) wird die tatsächlich auftretende Sperrschichttemperatur $\vartheta_{j\,vorh}$ ohne Kühlung errechnet,

die auf Grund des zu kleinen Kühlprofils ohne Kühlung unzulässig ist, da für diesen Fall $\vartheta_{j\,vorh} > \vartheta_{j\,max}$ zur Zerstörung des Transistors führen würde.
Am Kühlprofil tritt dabei die Temperatur

$$\vartheta_K = \vartheta_{j\,vorh} - P_V \cdot R_{thi}$$

auf, deren Größe eine grobe Abschätzung der Zwangskühlung ermöglicht.

— Man muß das Kühlprofil also so stark belüften, daß die zulässige Kühlprofiltemperatur $\vartheta_{K\,zul}$, nach Formel (4.7) bzw. Formel (4.8) unterschritten, und die Bedingung $\vartheta_{j\,vorh} < \vartheta_{j\,max}$ erfüllt wird.

Die Aufnahme der Erwärmungskurve bei Kühlung (Zwangskühlung) erfolgt analog Abschnitt 4.2.2.
Diese Betrachtungen gelten ebenso für einen isoliert auf ein Kühlprofil montierten Transistor.

Es sind die Hinweise bezüglich der Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta_u$ zu beachten.

Beispiel

Ein Leistungstransistor *KT 902 A* soll mit den Parametern

$\vartheta_j = 150\ °C$
$\vartheta_u = 45\ °C$
$R_{thi} = 3{,}3\ K/W$
$P_V = 25\ W$

arbeiten und aus gerätetechnischen Gründen auf Kühlprofil III (Normlänge 90 mm) isoliert montiert werden. Im Gerät befindet sich ein Querstromlüfter, der zur Zwangskühlung mit benutzt werden könnte.
Für diese Leistungsendstufe ist im Gerät ein Volumen $V_G \approx 587\ cm^3 \triangleq 9{,}5\ cm \cdot 9{,}5\ cm \cdot 6{,}5\ cm$ vorhanden.

Lösung:
Das Volumen des Kühlprofils III beträgt

$$V_{KP\ III} = 91\ mm \cdot 62\ mm \cdot 90\ mm = 507{,}7\ cm^3,\ \text{d. h.,}$$
$$V_G > V_{KP\ III}.$$

Aus Tabelle 6.3 wird die Isolierscheibe gewählt:
Glimmer 50 μm, beiderseitig gefettet, mit $R_{thiso} = 0{,}5\ K/W$.
Aus Diagramm Bild 4.4 ermittelt man für Kühlprofil III den Wärmewiderstand. Er beträgt $R_{thK} = 1{,}5\ K/W$.
Die Sperrschichttemperatur ohne Kühlung ist somit:

$$\vartheta_{j\ vorh} = P_V (R_{thi} + R_{thK} + R_{thiso}) + \vartheta_u,$$

$$\vartheta_{j\ vorh} = 25\ W\ (3{,}3\ °C/W + 1{,}5\ °C/W + 0{,}5\ °C/W) + 45\ °C,$$

$$\vartheta_{j\ vorh} = 177{,}5\ °C$$

ϑ_j wird also ohne Kühlung um $\vartheta = 27{,}5\ K$ überschritten.
Die Kühlprofiltemperatur ist ohne Kühlung

$$\vartheta_{K\ vorh} = \vartheta_{j\ vorh} - P_V (R_{thi} + R_{thiso}),$$

$$\vartheta_{K\ vorh} = 177{,}5\ °C - 25\ W\ (3{,}3\ °C/W + 0{,}5\ °C/W)$$
$$= 82{,}5\ °C$$

und wird gegenüber der zulässigen Kühlprofiltemperatur von

$$\vartheta_{K\,zul} = \vartheta_j - P_V\,(R_{thi} + R_{thiso})\,,$$

$$\begin{aligned}\vartheta_{K\,zul} &= 150\ °C - 25\ W\ (3{,}3\ °C/W + 0{,}5\ °C/W)\\ &= 55\ °C\end{aligned}$$

ebenfalls um $\vartheta = 27{,}5$ °C überschritten.

Zur Ableitung dieser Übertemperatur von 27,5 °C wurde die Oberfläche des Kühlprofils geschwärzt und dieses im Gerät über den bereits vorhandenen Querstromlüfter angeordnet. Bei einer Umgebungstemperatur $\vartheta_u = 22$ °C wurde die Erwärmungskurve aufgenommen. Diese mußte ihren Endwert bei

$$\vartheta_{K\,zul} = \vartheta_j - P_V\,(R_{thi} + R_{thiso}) - \triangle\,\vartheta_u\,,$$

$$\begin{aligned}\vartheta_{K\,zul} &= 150\ °C - 25\ W\ (3{,}3\ °C/W + 0{,}5\ °C/W)\\ &\quad - 23\ °C\,,\end{aligned}$$

$$\vartheta_{K\,zul} = 32\ °C$$

erreichen.

Nachdem die Erwärmungskurve bei $\vartheta_K = 35$ °C noch anstieg, wurde die Meßreihe abgebrochen.

Die untersuchte Variante mit Zwangskühlung erfüllte nicht die gestellten Forderungen.

Es muß also eine andere Variante untersucht werden. Dazu schaltet man 2 Leistungstransistoren *KT 902 A* parallel. Die Parameter ändern sich wie folgt:

ϑ_j = 150 °C
ϑ_u = 45 °C
R_{thi} = 3,3 K/W
P_V = 2 mal 12,5 W, d. h. 2 mal Kühlprofil.

Der erforderliche Wärmewiderstand (für jeden Transistor) beträgt:

$$R_{thK} = \frac{\vartheta_j - \vartheta_u}{P_V} - R_{thi} - R_{thiso}\,,$$

$$R_{thK} = \frac{150\ K - 45\ K}{12{,}5\ W} - 3{,}3\ K/W - 0{,}5\ K/W$$
$$= 4{,}6\ K/W\ .$$

Nach dem Diagramm Bild 4.4 ergibt sich mit

$R_{thK} = 4{,}6\ K/W$ und
2 mal Kühlprofil I,
$P_V = 12{,}5\ W$

Das Gesamtvolumen mit Kühlprofil I ist

$$V_{KPI} = 2\ (7{,}2\ cm \cdot 1{,}85\ cm \cdot 9{,}0\ cm) = 239{,}76\ cm^3.$$

Diese Variante erfüllt sogar ohne Zwangskühlung die Forderungen bezüglich der Einhaltung der Parameter und des Volumens, ist aber doppelt so teuer.

Eine weitere Möglichkeit wäre auch, beide Transistoren auf das vorgegebene Kühlprofil III zu montieren.

(Parallelschaltung der inneren Wärmewiderstände der Transistoren und der Isolierscheiben)
Mit

$$\vartheta_{j\ vorh} = P_V\ (R_{thi} + R_{thiso} + R_{thK}) + \vartheta_u\ ,$$

$$\vartheta_{j\ vorh} = 25\ W \left(\frac{3{,}3}{2} + \frac{0{,}5}{2} + 1{,}5\right) °C/W + 45\ °C$$
$$= 130\ °C\ .$$

wird die Bedingung $\vartheta_{j\ vorh} < \vartheta_{j\ max}$ ebenfalls erfüllt.

4.3. Einsatz von Kühlkörpern

4.3.1. Allgemeines, Einbau, Auswahl

Kühlkörper und Kühlprofile unterscheiden sich nicht wesentlich. Man kann ein Kühlprofil bestimmter Normlänge bereits als Kühlkörper bezeichnen. Damit ist gleichzeitig ausgesagt, daß Kühlkörper grundsätzlich in Normlängen (typisiert) zur Verfügung stehen.

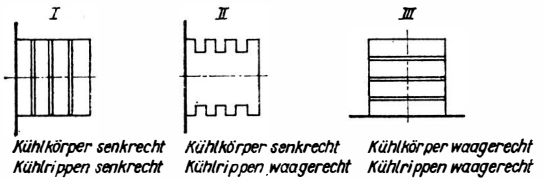


Bild 4.6 Einbaulagen der Kühlkörper

Kühlkörper werden in folgenden Einbaulagen montiert:
Die Einbaulage I zeigt die Normallage bei Konvektionskühlung. Alle Angaben in den Kenndatenblättern für normale Kühlung beziehen sich auf diese Einbaulage.
Die Einbaulagen II und III haben ungünstige Kühlverhältnisse, darum müssen die Belastungen verringert werden.
Diagramme für diese Reduzierungen sind in den Kenndatenblättern der Hersteller enthalten.
Bei forcierter Kühlung ist darauf zu achten, daß immer der kleinste Kühlkörperquerschnitt der Strömungsrichtung entgegensteht und die Kühlrippen parallel zur Strömungsrichtung verlaufen.
Werden mehrere Kühlkörper nebeneinander bzw. übereinander angeordnet, so ist ein bestimmter, vom Hersteller geforderter Mindestabstand einzuhalten.

Bei der Auswahl des Kühlkörpertyps ist zu beachten:

- die Einbaulage
- die Art der Kühlung
- die Anzahl der Kühlkörper
- die Aufstellungshöhe
- die Oberflächengüte der Kontaktstellen (Transistor und Kühlkörper mit Silikonfett fetten; das gilt auch bei Kühlblech und Kühlprofil.)
- Kühlkörper im Gerät isoliert oder leitend montieren
- Montage und Einbauvorschriften

Thermisch gilt für die Auswahl nur die Bedingung

$$R_{thK\ vorh} \leqq R_{thK\ err}\,.$$

Dabei ist $R_{thK\,vorh}$ der Wärmewiderstand des vorhandenen Kühlkörpers und $R_{thK\,err}$ der mit Formel (3.2) oder (3.4) errechnete erforderliche Wärmewiderstand des Kühlkörpers.

4.3.2. Zwangskühlung von Kühlkörpern

Für die Zwangskühlung von Kühlkörpern gilt analog die Darlegung in Abschnitt 4.2.3.
Bei einer Aufstellungshöhe elektronischer Geräte über 1000 m muß die Belastung reduziert oder die Kühlluftgeschwindigkeit erhöht werden, da die geringere Luftdichte nicht mehr die normale Kühlung bringt (das gilt auch für Kühlbleche und Kühlprofile).
Das Verhältnis der höheren Kühlluftgeschwindigkeit VL zur normalen Kühlluftgeschwindigkeit VL in Abhängigkeit von der Höhe zeigt das folgende Diagramm.
Dieses Diagramm gilt auch für Kühlbleche und Kühlprofile.

4.3.3. Kühlkörper für Dioden und Thyristoren

Das Kombinat *VEB Halbleiterwerk Frankfurt (Oder) Gleichrichterwerk Stahnsdorf* fertigt Kühlkörper speziell für Gleich-

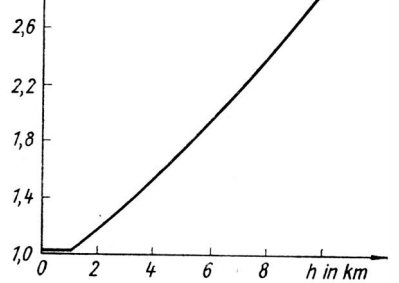


Bild 4.7
Verhältnis der erhöhten Kühlluftgeschwindigkeit zur normalen Kühlluftgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Aufstellhöhe

richterdioden und Thyristoren. Die Kühlkörperreihe besteht aus den Typen *K 10*, *K 25*, *K 50* und *K 200*.

Die Kühlkörper sind aus einer Aluminiumknetlegierung stranggepreßt und entsprechen dem Standard *TGL 24 232*. Sie werden in Normal- und DSRK-Ausführung geliefert.

Die Montage der Kühlkörper erfolgt in den Einbaulagen analog Abschnitt 4.3.1. (Bild 4.6).

Bei der Montage mehrerer Kühlkörper übereinander dürfen folgende Mittenabstände nicht unterschritten werden, da sich sonst durch gegenseitige Beeinflussung die thermischen Eigenschaften verschlechtern.

K 10	45 mm
K 25	55 mm
K 50	90 mm
K 200	135 mm

Sämtliche Diagramme gelten für direkte Montage auf Platten aus Hartpapier, Hartgewebe o. ä. Das Material ist je nach Kühlkörpergröße 3 ... 10 mm stark.

Der Bezugspunkt zur Messung der Kühlkörpertemperatur liegt unmittelbar neben dem Anschlußblech. Die genaue Lage wird in den Bildern durch ein „x" markiert.

4.3.3.1. Kühlkörper K 10

Die Kühlkörper *K 10* werden mit Anschlußgewinde M 6 als *K 10*/M 6 und M 8 als *K 10*/M 8 (Anschlußgewinde der Dioden und Thyristoren) hergestellt.

Man setzt sie vorwiegend für Siliziumgleichrichterdioden mit Strömen bis 10 A der Typenreihe *SY 160* ... *SY 166* ein. Bei natürlicher Luftkühlung können diese Dioden auf dem Kühlkörper *K 10* mit einem Laststrom bis 8,5 A betrieben werden.

Bild 4.9 bis Bild 4.11 zeigen die Abhängigkeit des Kühlkörperwärmewiderstandes R_{thK} von der Verlustleistung P_V und der Kühlluftgeschwindigkeit V_L.

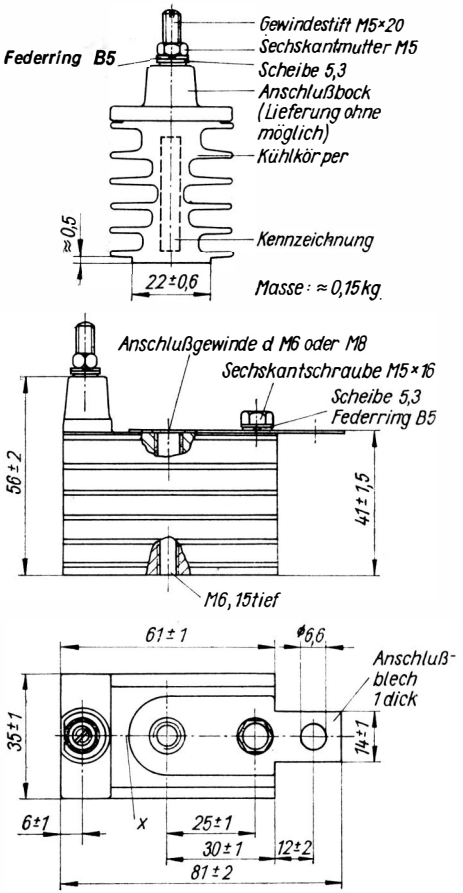


Bild 4.8 Abmessungen des Kühlkörpers *K 10*

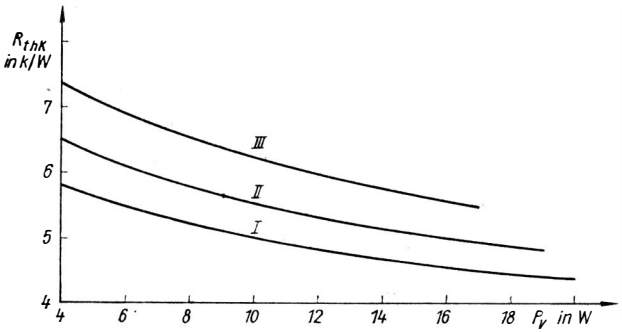


Bild 4.9 Kühlkörperwärmewiderstand in Abhängigkeit von der Verlustleistung mit der Einbaulage als Parameter

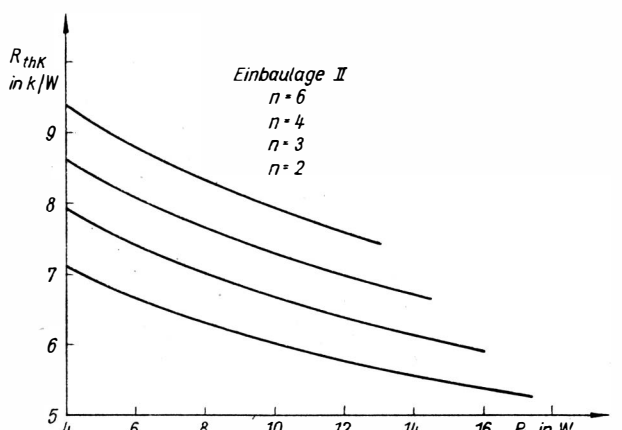


Bild 4.10 Kühlkörperwärmewiderstand in Abhängigkeit von der Verlustleistung mit der Anzahl „n" der übereinander montierten Kühlkörper als Parameter

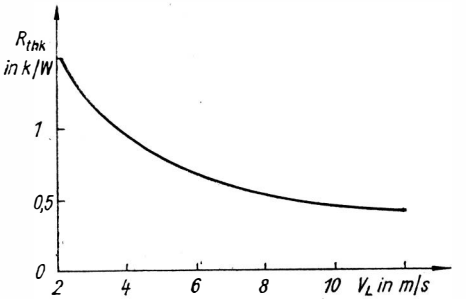


Bild 4.11 Kühlkörperwärmewiderstand in Abhängigkeit von der Kühlluftgeschwindigkeit

Hinweis
Der Einsatz anderer Typen von Dioden bzw. Thyristoren auf dem Kühlkörper *K 10* ist möglich. Es müssen lediglich die thermischen Kennwerte bekannt sein. Mit Formel (3.2) wird der erforderliche Wärmewiderstand des Kühlkörpers errechnet und aus dem Diagramm Bild 4.9 bzw. Bild 4.10 der vorhandene Wärmewiderstand entnommen.
Wird die Bedingung

$$R_{thK\ vorh} < R_{thK\ err}$$

erfüllt, so kann der Einsatz des Kühlkörpers erfolgen. Dieser Hinweis gilt generell für alle Kühlkörper.

4.3.3.2. Kühlkörper K 25

Die Kühlkörper *K 25* werden mit Anschlußgewinde M 6 als *K 25*/M 6, M 8 als *K 25*/M 8 und M 12 × 1,5 als *K 25*/M 12 × 1,5 hergestellt.
Man setzt sie unter anderem für Thyristoren der Typenreihe *ST 111/1 ... ST 111*/10 ein.
Bei natürlicher Luftkühlung kann der Laststrom 9 A betragen.

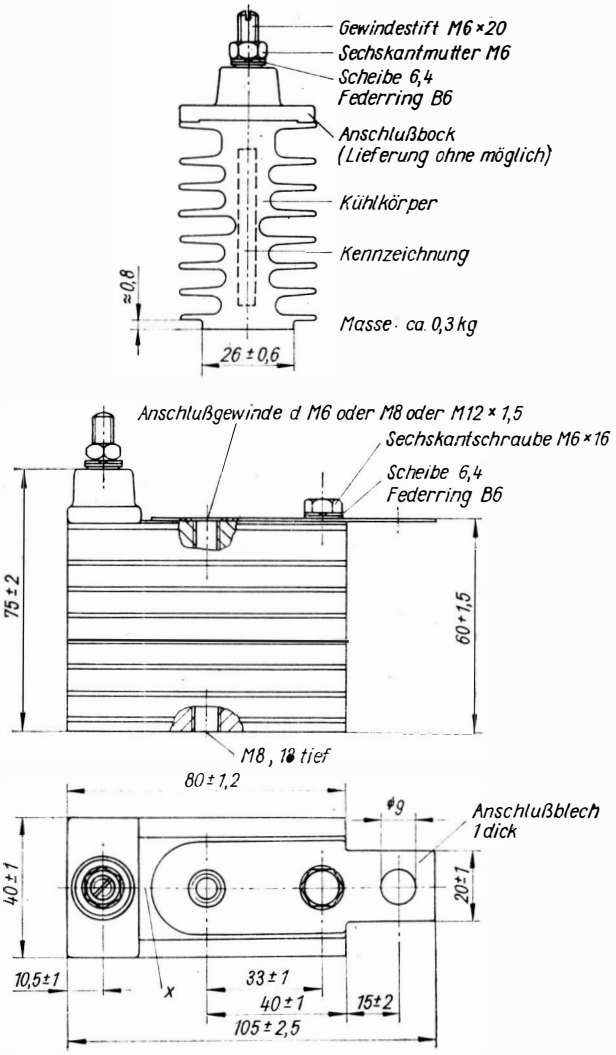


Bild 4.12 Abmessungen des Kühlkörpers *K 25*

Die Abhängigkeit des Kühlkörperwärmewiderstandes R_{thK} von der Verlustleistung P_V und der Kühlluftgeschwindigkeit V_L ist in Bild 4.13 bis Bild 4.15 dargelegt.

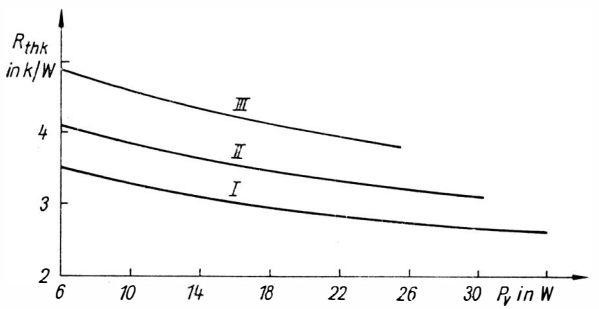


Bild 4.13 Kühlkörperwärmewiderstand in Abhängigkeit von der Verlustleistung mit der Einbaulage als Parameter

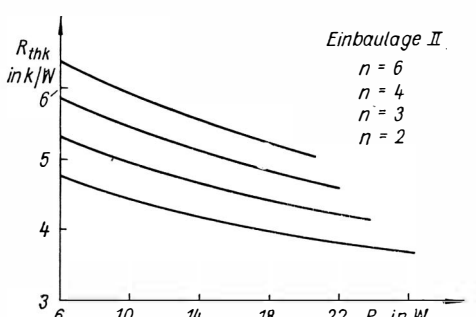


Bild 4.14 Kühlkörperwärmewiderstand in Abhängigkeit von der Verlustleistung mit der Anzahl „n" der übereinander montierten Kühlkörper als Parameter

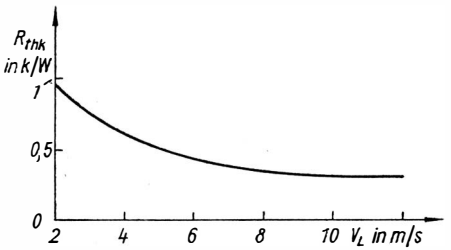


Bild 4.15 Kühlkörperwärmewiderstand in Abhängigkeit von der Kühlluftgeschwindigkeit

4.3.3.3. Kühlkörper K 50

Die Kühlkörper *K 50* werden mit Anschlußgewinde M 6 als *K 50*/M 6, M 8 als *K 50*/M 8, M 12 × 1,5 als *K 50*/M 12 × 1,5, mit Anschlußgewinde M 20 × 1,5 als *K 50*/M 20 × 1,5 und mit Anschlußblech als *K 50*/4 × M 6 gefertigt.

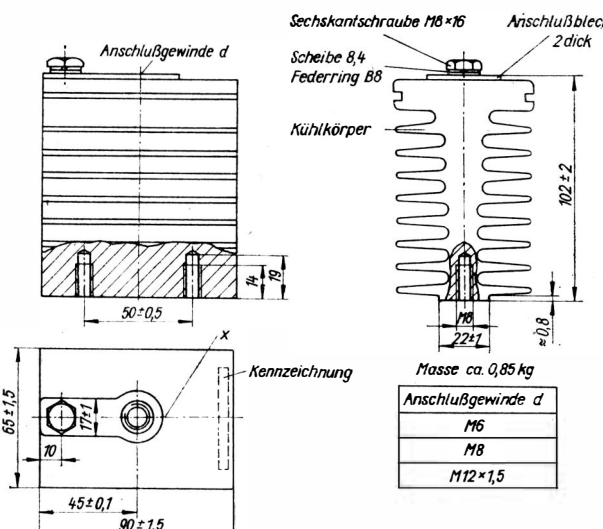


Bild 4.16 Abmessungen der Kühlkörper *K 50*

Den Typ *K 50*/M 8 setzt man z. B. für Thyristoren der Typenreihe *ST 111/1 ... ST 111/10* ein. Bei natürlicher Kühlung kann der Laststrom bis 13 A betragen.
Der Typ *K 50*/4×M 6 findet z. B. für Siliziumgleichrichterdioden *SY 250 (VSF 200* bzw. *VSF 203*) bis ≈ 50 A bei natürlicher Kühlung Anwendung.
Bild 4.19 bis Bild 4.21 zeigen die Abhängigkeit des Kühlkörperwärmewiderstandes R_{thK} von der Verlustleistung P_V und der Kühlluftgeschwindigkeit V_L.

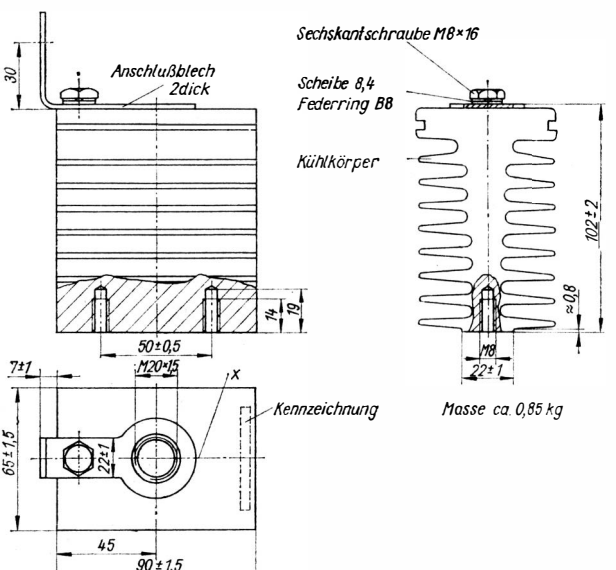


Bild 4.17 Abmessungen der Kühlkörper *K 50*

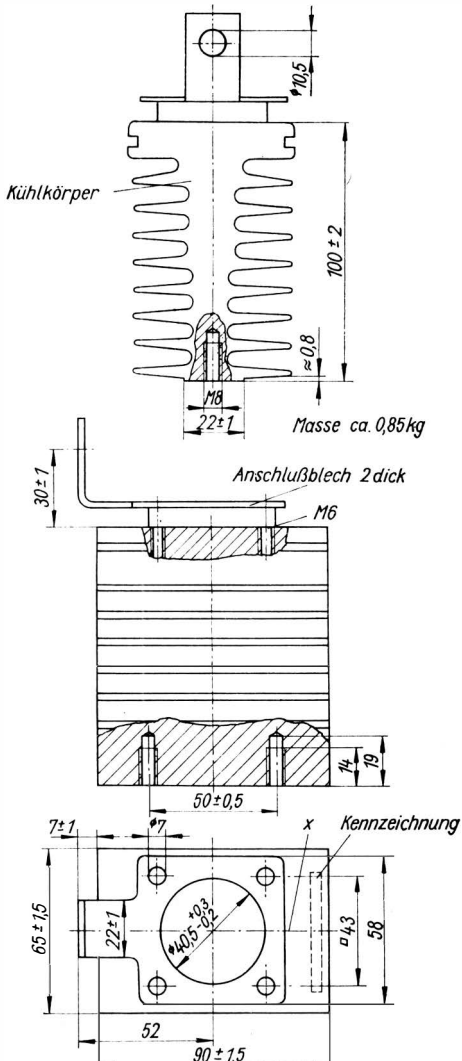


Bild 4.18 Abmessungen der Kühlkörper K 60

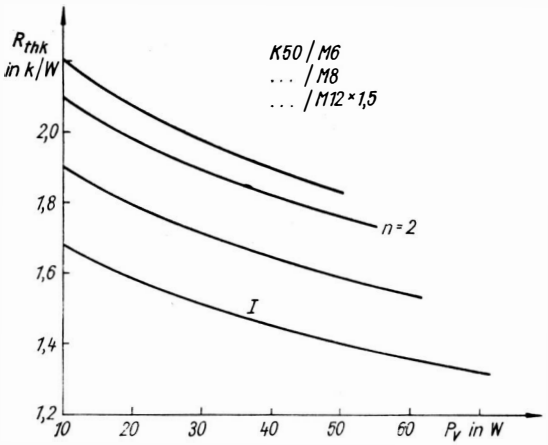
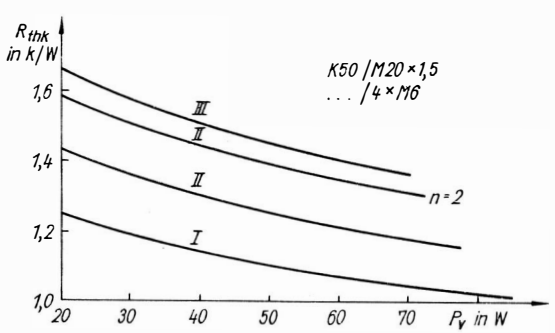


Bild 4.19
Bild 4.20
Kühlkörperwärmewiderstand in Abhängigkeit von der Verlustleistung mit der Einbaulage und Anzahl „n" der übereinander montierten Kühlkörper als Parameter



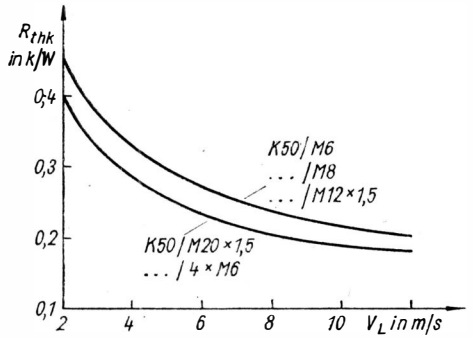


Bild 4.21 Kühlkörperwärmewiderstand in Abhängigkeit von der Kühlluftgeschwindigkeit

4.3.3.4. Kühlkörper K 200

Die Kühlkörper *K 200* werden mit Anschlußgewinde M 20×1,5 als *K 200*/M 20×1,5 und mit Anschlußblech als *K 200*/4×M 6 gefertigt.
Diese beiden Typen sind in Katalogen auch als *K 200 E* bezeichnet.
Eine weitere Form der *K 200*-Reihe sind die Kühlkörper *K 200 A* und *K 200 B*, die mit Anschlußblech als *K 200*/4×M6 gefertigt werden.
Die *K 200*-Reihe wird vorwiegend für Siliziumgleichrichterdioden der Typen *SY 250*/0,5 ... *SY 250*/10 (früher *VSF 203*/0,5 ... *VSF 203*/6) verwendet. Bei natürlicher Luftkühlung sind dabei Lastströme bis 100 A realisierbar.
Die Abhängigkeit des Kühlkörperwärmewiderstandes R_{thK} von der Verlustleistung P_V und der Kühlluftgeschwindigkeit v_L ist aus Bild 4.25 und Bild 4.24 ersichtlich.

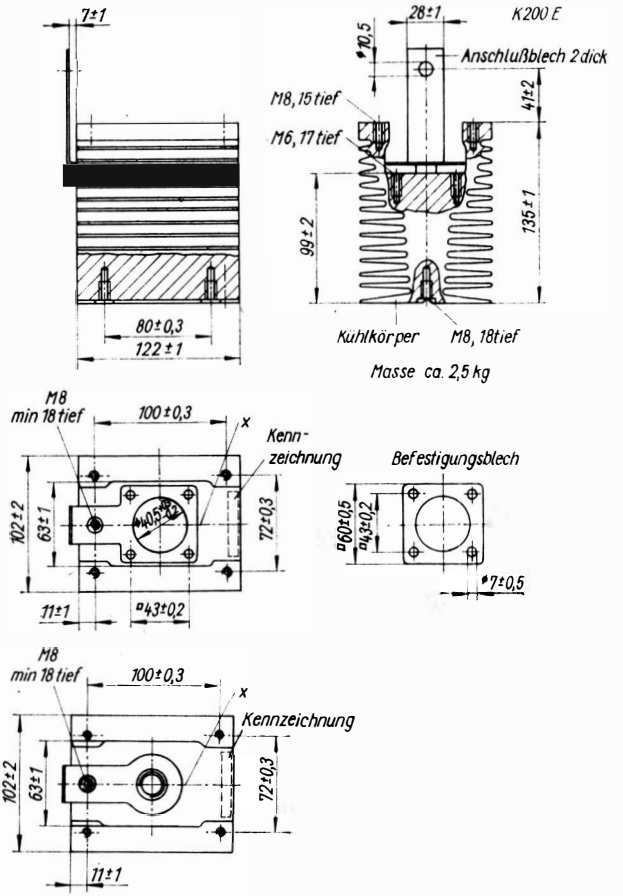
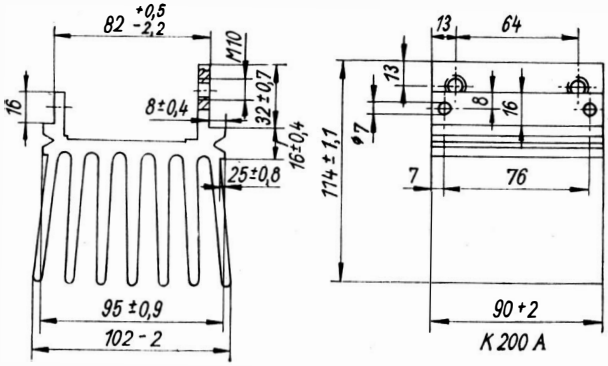
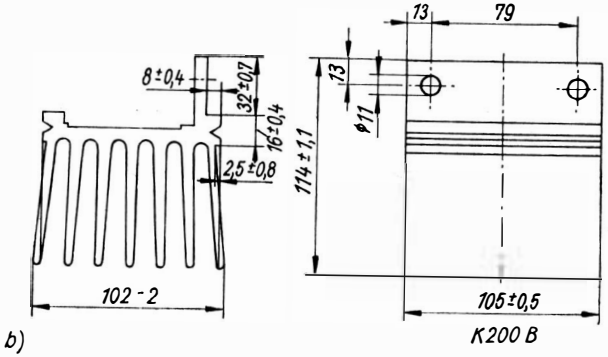


Bild 4.22 Abmessungen des Kühlkörpers K 200 E



a)

Bild 4.23 Abmessungen des Kühlkörpers *K 200* A



b)

Bild 4.24 Abmessungen des Kühlkörpers K 200 B

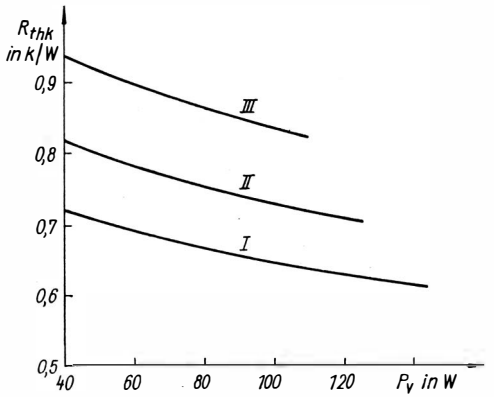


Bild 4.25 Kühlkörperwärmewiderstand in Abhängigkeit von der Verlustleistung mit der Einbaulage als Parameter (gilt exakt nur für *K 200 E*)

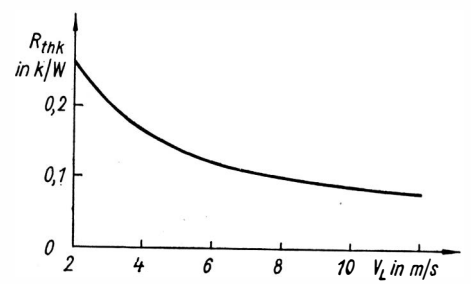


Bild 4.26 Kühlkörperwärmewiderstand in Abhängigkeit von Kühlluftgeschwindigkeit (gilt exakt nur für *K 200 E*)

4.3.3.5. Kühlbleche für Dioden und Thyristoren

Für Dioden und Thyristoren mit Verlustleistungen bis $P_V \approx 25$ W werden oft Kühlbleche bevorzugt.
Die Berechnung der Kühlbleche erfolgt wie bei Transistoren mit den Formeln (3.2) und (4.3) bis (4.6) oder den Diagrammen nach Bild 4.1.

Beispiel
Ein Thyristor *ST 111/4* mit den Parametern

$I_{TL} = 5$ A $\quad \vartheta_j = 110$ °C
$U_{TL} = 1{,}5$ V $\quad \vartheta_u = 45$ °C
$R_{thi} = 1{,}3$ K/W

soll auf ein Kühlblech montiert werden.

Material:	Aluminium 3 mm
Lage und Oberfläche:	blank, senkrecht

Es ist die Kühlblechfläche zu berechnen.

Lösung:
Aus Anhang, Tabelle 5 $K_{bs} = 1{,}27$

$$P_V = I_{TL} \cdot U_{TL} = 5\text{ A} \cdot 1{,}5\text{ V} = 7{,}5\text{ W}$$

$$R_{thK} = \frac{\vartheta_j - \vartheta_u}{P_V} - R_{thi},$$

$$R_{thK} = \frac{110\text{ K} - 45\text{ K}}{7{,}5\text{ W}} - 1{,}3\text{ K/W} = 7{,}37\text{ K/W}$$

$$A = \frac{552{,}5}{R_{thK} - K_{bs}} = \frac{552{,}5}{7{,}37 - 1{,}27} = 90{,}5$$

$$A = 90{,}5$$

$\frac{A}{cm^2}$	$\frac{R_{thK}}{K/W}$

Das gewählte Kühlblech hat die Maße $100 \times 100 \times 3$ mm.

4.3.3.6. Verwendung der K-Reihe für Transistoren

Die Nutzung eines Teils der Kühlkörper für Gleichrichter zur Wärmeabteilung an Transistoren ist möglich, wenn einige mechanische Änderungen vorgenommen werden. Diese mechanischen Änderungen beinhalten:

— Fertigung von Abdeckplatten
(Auf bzw. in diese wird der Transistor montiert.)
— Bohren und Gewindeschneiden in Kühlkörper
(zur Verschraubung der Abdeckplatten)
— Drehen oder Fräsen in der Kühlkörperfläche
(zum teilweise oder Volleinsenken des Transistors)

Die Kühlkörper *K 25* und *K 50* ohne Anschlußbock sind für Verlustleistungen bis $P_V \approx 6$ W (*K 25*) und $P_V \approx 10$ W (*K 50*) einsetzbar. Für Leistungen bis $P_V \approx 40$ W eignen sich die Kühlkörper *K 200*. Vor der Anwendung der Kühlkörper sollte aber auf jeden Fall berechnet werden, ob der Einsatz von Kühlblechen noch vertretbar ist, da die notwendigen mechanischen Änderungen an den Kühlkörpern aufwendig sind und sehr sorgfältig ausgeführt werden müssen.
Hat man sich aber für den Einsatz dieser Kühlkörper entschlossen, so ist nach der Montage die Gehäusetemperatur ϑ_G (bei direkter Montage $\vartheta_G = \vartheta_K$) bei Nennbetrieb nachzumessen. Ihre zulässige Größe wird mit Formel (4.7) ermittelt.

5. Temperaturmessung an Kühlblechen, Kühlprofilen und Kühlkörpern

5.1. Allgemeines

Temperaturmessungen an Transistoren sind ein wichtiges Mittel zum praktischen Nachweis der richtigen Dimensionierung der Kühlbleche, Kühlprofile und Kühlkörper. Sie sind unter spezifischen Bedingungen, wie sie in Abschnitt 4.2.2. und Abschnitt 4.2.3. dargelegt wurden, Voraussetzung zur Lösung des Kühlproblems. Betrachtet man darüber hinaus solche Fragen wie

— Fernanzeige der Temperatur,
— Temperaturkompensation,
— Schutz vor thermischer Überlastung,
— Berücksichtigung benachbarter Wärmequellen,

so wird die Bedeutung der Temperaturmessung noch unterstrichen. Dem Amateur und in vielen Fällen auch dem Praktiker stehen aber nur selten industriell gefertigte Temperaturmeßeinrichtungen zur Verfügung, und er ist gezwungen, sich selbst eine Meßschaltung aufzubauen.
Es werden in diesem Abschnitt 3 Meßschaltungen vorgestellt, die für diesen Anwendungszweck hinreichend genau sind.

5.2. Temperaturfühler

Durch ihren großen Temperaturkoeffizienten eignen sich Thermistoren als Temperaturfühler besonders gut. Das Angebot des VEB *Keramische Werke Hermsdorf*, vom Anlaßheißleiter über den Kompensationsheißleiter bis zum speziellen Meßheißleiter in Fühlerform, ist dafür geeignet und meist auch in irgendeiner Ausführung im Besitz des Amateurs.
Thermistoren sind nicht die einzigen Halbleiterbauelemente, die sich als Temperaturfühler eignen, auch Dioden und Transistoren werden angewendet.

Bei Dioden nutzt man den Sperrstrom oder die Durchlaßspannung als Maß der Temperatur und bei Transistoren den temperaturabhängigen Reststrom oder die Basis-Emitter-Spannung aus. Auf den möglichen Einsatz von Hitzdraht (Platin- oder Wolframdraht) oder Halbleiter-Dehnmeßstreifen sei an dieser Stelle nur hingewiesen.
Die empfohlenen Schaltungen und Dimensionierungshinweise beziehen sich ausschließlich auf Thermistoren als Temperaturfühler.
Beachte:
Der Temperaturfühler ist in unmittelbarer Nähe des Transistors, auf dem Kühlblech, Kühlprofil oder Kühlkörper zu montieren. Zusätzliche Messungen, z. B. an außenliegenden Punkten, zwischen oder an Kühlrippen, ermöglichen eine gute Einschätzung der Wärmeableitung. Der Temperaturfühler kann je nach Anwendungsform angeklemmt, angeschraubt oder angeklebt werden.

5.3. Grundschaltung zur Messung

Zur analogen elektrischen Messung nichtelektrischer Größen werden vorwiegend Brückenschaltungen verwendet. Dabei dient die *Wheatstone*-Brücke als Grundschaltung.
Bei der Verwendung der *Wheatstone*-Brücke zur Temperaturmessung wird ein ohmscher Widerstand durch einen Thermistor ersetzt, und die anderen ohmschen Widerstände werden nach der Größe des Kaltwiderstandes des Thermistors R_{20} dimensioniert. Die Brücke ist dann bei einer Temperatur $\vartheta = 20\ °C$ im Gleichgewicht, da nur mit dem Kaltwiderstand des Thermistors R_{20} die Brückengleichung erfüllt werden kann. Mit zunehmender Erwärmung sinkt der Widerstand des Thermistors, die Brücke verliert ihren Gleichgewichtszustand, und es fließt ein Strom im Brückenzweig. Dieser Strom, den die Widerstandsänderung des Thermistors verursacht, ist somit ein Maß für die Temperatur.
Mit der bekannten Formel für den Gleichgewichtszustand der Brücke, der sogenannten Brückengleichung

$$R_1 R_4 = R_2 R_3 ,$$

ist die Berechnung der Momentanzustände der Brücke nicht möglich, da als Bedingung vorausgesetzt wird, daß der Strom im Brückenzweig $I_5 = 0$ ist. Die Temperaturmessung erfolgt, wie bereits angeführt, aber ausschließlich außerhalb des Gleichgewichtszustandes der Brücke. Deshalb wurden für die Brückenschaltung die nachstehend aufgeführten Formeln zur Berechnung jedes beliebigen Zustandes der Brücke abgeleitet.

$$I_1 = E \frac{R_3 (R_2 + R_4 + R_5) + R_4 R_5}{R_1 (R_2 + R_5)(R_3 + R_4) + R_2 R_5 (R_3 + R_4) + R_3 R_4 (R_1 + R_2)} \tag{5.1}$$

$$I_2 = E \frac{R_4 (R_1 + R_3 + R_5) + R_3 R_5}{\text{Nenner } (I_1)} \tag{5.2}$$

$$I_3 = E \frac{R_1 (R_2 + R_4 + R_5) + R_2 R_5}{\text{Nenner } (I_1)} \tag{5.3}$$

$$I_4 = E \frac{R_2 (R_1 + R_3 + R_5) + R_1 R_5}{\text{Nenner } (I_1)} \tag{5.4}$$

$$I_5 = E \frac{R_2 R_3 - R_1 R_4}{\text{Nenner } (I_1)} \tag{5.5}$$

$$I_1 = I_5 + I_2 \tag{5.6}$$

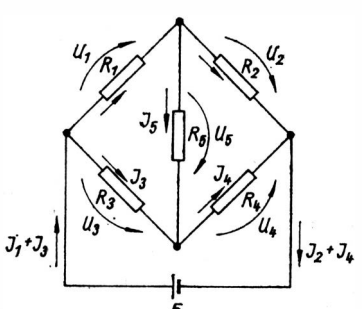


Bild 5.1
Wheatstone-Brücke als Grundschaltung

$$I_4 = I_5 + I_3 \tag{5.7}$$

$$U_1 \ldots U_5 = I_1 \ldots I_5 \cdot R_1 \ldots R_5 \tag{5.8}$$

$$U_5 = U_3 - U_1 = U_2 - U_4 \tag{5.9}$$

$$E = U_1 + U_2 = U_3 + U_4 \tag{5.10}$$

Entsprechend den Genauigkeitsanforderungen an die Temperaturmessung bzw. deren Art (Direkt- oder Differenzmessung) können in die *Wheatstone*-Brücke an Stelle ohmscher Widerstände 1 oder 2 Thermistoren geschaltet werden. Man wendet 3 Schaltungen an:

1. Temperaturmessung mit Genauigkeit ≈ 1 K
   Ein Thermistor wird an die Stelle eines ohmschen Widerstandes in die Brücke geschaltet. (Bevorzugt werden R_1 oder R_2.)
2. Temperaturmessung mit Genauigkeit $< 0{,}5$ K
   2 Thermistoren an Stelle der ohmschen Widerstände R_1 und R_4 oder R_2 und R_3 in die Brücke schalten.
   (Als Anzeigeinstrument μA-Meter oder Röhrenvoltmeter; beide Thermistoren am Meßobjekt montieren.)
3. Temperaturdifferenzmessung
   2 Thermistoren werden an Stelle der ohmschen Widerstände R_1 und R_3 oder R_2 und R_4 in die Brücke geschaltet. Bei gleicher Temperatur an beiden Thermistoren ist die Brücke im Gleichgewicht.
   (Anwendung z. B. Gegentaktendstufe mit getrennten Kühlblechen; Differenz zwischen Transistormontagestell und Kühlrippen.)

5.3.1. Der Thermistor in der Brückenschaltung

Beim Einsatz des Thermistors als Temperaturfühler sind einige Besonderheiten zu beachten.
Der durch den Thermistor fließende Strom darf keine Eigenerwärmung hervorrufen, da es sonst zur Verfälschung des Meßergebnisses kommt.
Die Grenzleistung ohne Eigenerwärmung P_{Grenz} muß nur

wenige Prozent der zulässigen Maximalleistung betragen. Sie wird in Datenblättern und Katalogen vom Hersteller angegeben. So ist z. B. bei den *TNM*-Typen die maximale Belastbarkeit in Luft $P_{max} = 1$ W, die Grenzleistung ohne Eigenerwärmung dagegen nur $P_{Grenz} = 0{,}5$ mW.
Der Strom, der bei der Messung durch den Thermistor fließen darf, ergibt sich aus

$$I_{20} = \sqrt{\frac{P_{Grenz}}{R_{20}}} \text{ , wobei} \tag{5.11}$$

$$I_{\vartheta} = \sqrt{\frac{P_{Grenz}}{R_{\vartheta}}} \text{ ist .} \tag{5.12}$$

Damit die Grenzleistung ohne Eigenerwärmung P_{Grenz} immer unterschritten wird, rechnet man in der Praxis mit

$$I_{20\,gew} \approx {}^1/_3\, I_{20} .$$

Der Strom $I_{20\,gew}$ ist dann der Strom, der im Gleichgewichtszustand der Brücke tatsächlich durch den Thermistor fließt. Die tatsächliche Verlustleistung des Thermistors ergibt sich aus

$$P_{20} = I^2 \cdot R_{20} \quad \text{und} \tag{5.13}$$

$$P_{\vartheta} = I_{\vartheta}^2 \cdot R_{\vartheta} . \tag{5.14}$$

Merke:
I_{20} bzw. I_{ϑ} werden nach Formel 5.1 bis Formel 5.4 berechnet. Die Auswahl der Spannung E für die Brückenschaltung erfolgt unter der Voraussetzung, daß die Brücke im Gleichgewicht, also $I_5 = 0$ ist.

$$E = I_{20\,gew} (R_{20} + R_2) \tag{5.15}$$

Es ist nicht möglich, eine Brückenschaltung zu dimensionieren, aufzubauen und anschließend damit die Temperatur zu messen, da die Zuordnung des Stromes im Brückenzweig zum Widerstand des Thermistors nicht exakt bestimmt werden kann. Die Ursachen sind in den Fertigungstoleranzen der Thermistoren zu suchen, die bei den Widerstandswerten bis

$\pm$ 20% und den b-Werten bis $\pm$ 20% liegen. Diese Toleranzen sind nur vom Toleranzbereich (z. B. $\pm$ 5%, $\pm$ 10%, $\pm$ 20%), aber nicht vom genauen Wert her bekannt. Sie lassen sich zwar meßtechnisch ermitteln, aber dazu ist die Aufnahme der Erwärmungskurve notwendig. (Es ist allerdings weitaus günstiger, die Erwärmungskurve des Thermistors in die Schaltung aufzunehmen.)

Wie wirken sich diese Toleranzen, die ja gleich durch 2 Komponenten verursacht werden, praktisch aus?

Die Abhängigkeit des Widerstandes eines Thermistors wird angenähert durch die Gleichung

$$R_\vartheta = R_{20} \cdot \exp b \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right) \text{ beschrieben.} \qquad (5.16)$$

Die Berechnung nach dieser Ableitung ist sehr aufwendig und

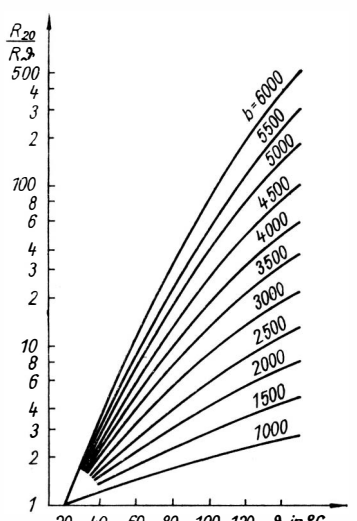


Bild 5.2
Nomogramm zur Bestimmung des Thermistorwiderstandes in Abhängigkeit von der Temperatur [10]

auch nicht jedem geläufig. Man verwendet deshalb in der Praxis Nomogramme.

In ihnen ist das Verhältnis des Kaltwiderstandes zum Warmwiderstand, in Abhängigkeit von der Temperatur mit dem b-Wert als Parameter,

$$\frac{R_{20}}{R_\vartheta} = f(\vartheta) \text{ dargestellt .}$$

Den minimal und maximal möglichen Widerstand des Thermistors bei der Temperatur ϑ errechnet man somit aus

$$R_{\vartheta max} = \frac{R_{20\ max}}{\left.\frac{R_{20}}{R_\vartheta}\right|_{0,9b}} \quad \text{bzw.} \quad R_{\vartheta min} = \frac{R_{20\ min}}{\left.\frac{R_{20}}{R_\vartheta}\right|_{1,1b}} \quad . \tag{5.17} \quad (5.18)$$

Der Hersteller von Thermistoren gibt in seinen Katalogen ebenfalls die Temperaturabhängigkeit des Widerstandes $R = f(\vartheta)$ an. Es handelt sich hierbei um gemittelte Kurven, in denen die Toleranzen nicht berücksichtigt wurden; z. B. ergibt sich aus den zum *TNM 15 K/10-10* gehörenden Diagramm der Widerstand bei der Temperatur $\vartheta = 100$ °C zu $R_{100} = 0{,}9$ kΩ, nach Formel (5.16) aber $R_{100} = 0{,}64$ kΩ ... 1,37 kΩ.

Die Darlegungen in diesem Abschnitt beweisen, daß durch die Toleranzen beider Komponenten relativ große Widerstandsbereiche entstehen können. Diese führen dann auch zu entsprechenden Toleranzen des Stromes im Brückenzweig. Damit wird die Zuordnung des Widerstandswertes zum Stromwert und somit zur Temperatur so ungenau, daß sie nicht mehr vertretbar ist. Es ist demzufolge sinnvoll, die Meßschaltung nur überschlagsmäßig zu dimensionieren, anschließend die Erwärmungskurve des Thermistors (in der Meßschaltung) aufzunehmen und die Skaleneichung des Anzeigeinstruments in Form einer Wertetabelle oder eines Diagramms durchzuführen.

5.3.2. Eichung der Meßschaltung

Im vorhergehenden Abschnitt wurde nachgewiesen, daß zur Durchführung der Temperaturmessung die Aufnahme der Erwärmungskurve des Thermistors in der Meßschaltung erforderlich ist. Diese „Eichung" erfolgt nach dem Schaltungsaufbau einmalig durch Vergleich mit einem normalen Thermometer (genauer mit Präzisionsthermometer).

Die Eichkurve muß punktförmig über den gesamten Skalenverlauf aufgenommen werden, da die Anzeige auf Grund des Widerstandsverlaufes des Thermistors nicht linear verläuft. Vorhandene Skaleneinteilungen sind deshalb nicht ohne weiteres verwendbar. Es muß entweder eine neue Skale für das Meßinstrument angefertigt oder eine Eichkurve gezeichnet werden, aus der man zu jedem Skalenwert die zugehörige Temperatur ablesen kann.

Eine Linearisierung der Eichkurve zur Verwendung vorhandener Skalen ist durch Reihen- und Parallelschaltung ohmscher Widerstände zum Thermistor in bestimmten Grenzen möglich. Die Dimensionierung derartiger Schaltungen ist sehr aufwendig [9].

Die Aufnahme der Eichkurve dient dem Soll-Ist-Vergleich. Je größer die Anforderungen für die Näherung an eine Gerade sind, desto größer ist auch der Aufwand für Dimensionierung und Eichung.

Die Eichkurve wird in einem Thermostat aufgenommen. Ist kein Thermostat vorhanden, so kann man sich wie folgt helfen:

— In einem Gefäß wird Öl (Motorenöl, Getriebeöl o. ä.) auf die vorgegebene Temperatur erhitzt. Aus Gründen einer gleichmäßigen Wärmeableitung soll die Ölmenge nicht zu klein sein (minimal 3 Liter).

— Nach Erreichen der Maximaltemperatur für den gewünschten Meßbereich ist das Öl gut umzurühren. Anschließend werden das Thermometer und der Thermistor in das Öl getaucht.

  Der Meßpunkt des Thermometers und der Thermistor müssen dicht beieinander angebracht werden, damit an beiden stets die gleiche Temperatur auftritt, und sollen

sich möglichst in der Mitte des Ölbades befinden, da dort die kontinuierlichste Wärmeabnahme ist.

— Es wird nicht die Erwärmungskurve, sondern die Abkühlungskurve als Eichkurve punktweise über den gesamten Temperaturbereich aufgenommen. Aus der gezeichneten Eichkurve kann man dann die zu jedem Skalenwert gehörende Temperatur entnehmen.

5.4. Temperaturmeßschaltungen

5.4.1. Anzeige mit Strommesser

In der Grundschaltung nach Bild 5.1 wird R_1 durch einen Thermistor und R_5 durch einen Strommesser ersetzt. In Abhängigkeit von der Größe und dem Bereich des Stromes im Brückenzweig I_5 benutzt man ein μA-Meter (Bereiche 0 ... 100 μA), einen Vielfachmesser *EAW III*, einen Vielfachmesser *EAW IV*, einen Vielfachmesser *III* Karl-Marx-Stadt, einen Vielfachmesser *Uni 7* oder einen Multiprüfer.
Diese Schaltung ist die einfachste Art einer Brückenschaltung zur Temperaturmessung. Jedem Stromwert des Strommessers im Brückenzweig ist ein Temperaturwert zugeordnet, der bei der Aufnahme der Eichkurve (Diagramm oder Wertetabelle) ermittelt wird.

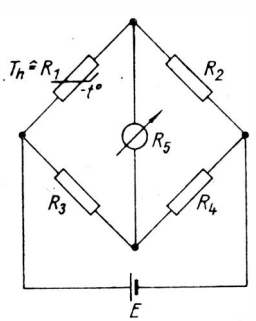


Bild 5.3
Meßschaltung mit Strommesser im Brückenzweig

Dimensionierungshinweise

a) Thermistor auswählen

b) Brückenwiderstände festlegen

$$R_2 = R_3 = R_4 = R_{20}$$

Wird für den Anfangsbereich eine größere Anzeigeempfindlichkeit gefordert, so wählt man günstiger

$$R_{20} = R_2 \gg R_3 = R_4 .$$

Das ergibt im Anfangsbereich etwa die doppelte Anzeigeempfindlichkeit.

Die Berechnung vereinfacht sich, da man in Näherung $U_3 = U_4 =$ constant annehmen kann.

c) Meßinstrument auswählen
Vielfachmesser *III* Karl-Marx-Stadt z. B.:

$$R_{iA} = \frac{U_v}{I_{Bereich}} = \frac{200\ mV}{250\ \mu A} = 0{,}8\ k\Omega$$

$R_{iA} = R_5$

d) Zulässigen Strom durch den Thermistor bei $\vartheta = 20$ °C berechnen

$$I_{20} = I_{1\ 20} = \sqrt{\frac{P_{Grenz}}{R_{20}}}$$

e) Strom durch den Thermistor bei $\vartheta = 20$ °C festlegen

$$I_{20\ gew} < I_{20};\ I_{20\ gew} \approx {}^1/_3\, I_{20}\ \text{(in der Praxis)}$$

f) Spannung der Brücke berechnen

$$E = I_{20\ gew}\,(R_{20} + R_2)$$

g) Thermistorwiderstand bei Umgebungstemperatur ϑ_u nachmessen (z. B. mit Ohmmeter)

Danach Strom im Brückenzweig I_5 (Anfangswert) nach Formel 5.5 mit $R_1 = R_{gemessen}$ und $R_5 = R_{iA}$ berechnen.

h) $R\vartheta_{min}$ für ϑ_{max} berechnen

$$R\vartheta_{min} = \frac{R_{20min}}{\left.\frac{R_{20}}{R\vartheta}\right|} \quad 1{,}1b$$

$\frac{R_{20}}{R\vartheta}$ aus Diagramm Bild 5.2 ermitteln.

i) Maximal mögliche Stromanzeige im Brückenzweig I_5 (Endwert) nach Formel (5.5) mit $R_1 \triangleq R\vartheta_{min}$ und $R_5 = R_{iA}$ berechnen
Danach kontrollieren, ob Meßinstrument richtig gewählt wurde.

j) Eichkurve analog Abschnitt 5.3.2. aufnehmen

Beispiel

Es ist eine Brückenschaltung zur Temperaturmessung im Bereich $\vartheta = 20$ °C bis $\vartheta = 100$ °C nach Bild 5.3 mit einem Thermistor *TNM 15 k/10-10* zu dimensionieren.
Daten des *TNM 15 k/10-10:*

$R_{20} = 15\,k\Omega \pm 10\%$

$b = 3800\,K \pm 10\%$

$P_{Grenz} = 0{,}5\,mW$

$\tau_{150\,°C} = 30\,s \pm 10\,s$

Die Lösung erfolgte nach den einzelnen Punkten der Dimensionierungshinweise. Es wurden die möglichen Toleranzen mit eingerechnet. Das ist in der Praxis nicht notwendig, denn da genügt die Berechnung mit den Grenzwerten. Die Toleranzen in den Berechnungen wurden lediglich berücksichtigt, um noch einmal auf die aus den Fertigungstoleranzen des Thermistors resultierenden Toleranzen der Ströme I_1, I_5 und der Verlustleistung P_{20} sowie P_{100} zu verweisen.

Lösung

a) *TNM 15 k/10-10*

$R_{20} = 15\,k\Omega \pm 10\%$

$R_{20} = 13{,}5\,k\Omega \ldots 16{,}5\,k\Omega$

b) $R_2 = R_3 = R_4 = 15\ k\Omega$

c) μA-Meter 0 ... 100 μA, mit $R_{iA} = 1\ k\Omega$

d) Nach Formel (5.11)

$$I_{20} = 0{,}173\ mA \ldots 0{,}193\ mA$$

e) $I_{20\ gew} = 0{,}05\ mA$

f) Nach Formel (5.15)

$$E = 1{,}5\ V$$

g) Keine Nachmessung von R_{20}, Rechnung mit Toleranz nach Formel (5.5)

$$I_{5\ 20} = -2{,}17\ \mu A \ldots 2{,}53\ \mu A$$

h) Aus Diagramm Bild 5.2

$$\left.\frac{R_{20}}{R\vartheta}\right|_{1{,}1b} = 21$$

$$\left.\frac{R_{20}}{R\vartheta}\right|_{0{,}9b} = 12$$

Nach Formel (5.17) und (5.18)

$$R_{100} = 0{,}64\ k\Omega \ldots 1{,}37\ k\Omega$$

i) Nach Formel (5.5)

$$I_{5\ 100} = 63{,}6\ \mu A \ldots 75{,}5\ \mu A$$

Meßinstrument wurde richtig gewählt.

j) Nach Formel (5.1)

$$I_{1\ 20} = 0{,}046\ mA \ldots 0{,}054\ mA$$

$$I_{1\ 100} = 0{,}149\ mA \ldots 0{,}168\ mA$$

Nach Formel (5.13)

$$P_{20} = 0{,}034\ mW \ldots 0{,}039\ mW$$

Nach Formel (5.14)

$$P_{100} = 0{,}018\ mW \ldots 0{,}030\ mW$$

k) Die Darstellung der Eichkurve in diesem Beispiel ist unzweckmäßig, da sie immer nur für den verwendeten Thermistor gilt.
Die Eichkurve gilt nur für die Spannung E, mit der sie aufgenommen wurde.

5.4.2. Direkte Anzeige

In der Grundschaltung wird R_2 durch einen Thermistor, R_4 durch ein logarithmisches Potentiometer und R_5 durch einen Strommesser mit Mittelpunktanzeige ersetzt.
Diese Schaltung hat den Vorteil, daß die Temperatur nach dem Eichen sofort abgelesen werden kann.
Der Strommesser dient nur als Indikator, es muß lediglich der Nullpunkt genau markiert sein. Um die Temperatur des Thermistors genau festzustellen, wird das Potentiometer so lange abgeglichen, bis $I_5 = 0$, d. h. der Strommesser Null anzeigt. Der Widerstand des Potentiometers ist dann gleich dem des Thermistors und somit ein Maß für die Temperatur.
Man kann bei der Aufnahme der Eichkurve gleich das Potentiometer mit einer Skale versehen und diese in °C eichen.
Ein logarithmisches Potentiometer verwendet man, damit ein möglichst stetiger Skalenverlauf entsteht.
Dimensionierungshinweise
a) Thermistor auswählen

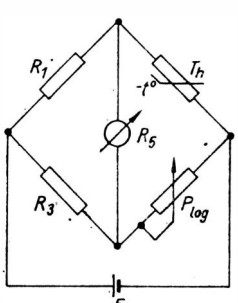


Bild 5.4
Meßschaltung mit Strommesser als Indikator

b) Brückenwiderstände festlegen

$$R_1 = R_3 = R_{20}$$

c) Zulässigen Strom I_{20} mit Formel (5.11) berechnen

d) Strom durch den Thermistor $I_{20\,gew}$ festlegen

$$I_{20\,gew} \approx {}^1/_3\, I_{20}$$

e) Strommesser festlegen

$$I = 50\,\mu A \ldots 100\,\mu A \text{ (mit Nullpunkt-Mitte)}$$

f) Potentiometer festlegen

$$P_{10g} \approx 2 \cdot R_{20}$$

g) Spannung E nach Formel (5.15) berechnen

h) Eichkurve aufnehmen
Potentiometer bei jedem Temperaturwert auf Brückenstrom $I_5 = 0$ abgleichen und Temperaturwert in die Skale eintragen.

5.4.3. Anzeige mit Röhrenvoltmeter

In der Grundschaltung wird R_1 durch einen Thermistor und R_5 durch ein Röhrenvoltmeter ersetzt.
In dieser Schaltung verwendet man als Anzeigeinstrument ein

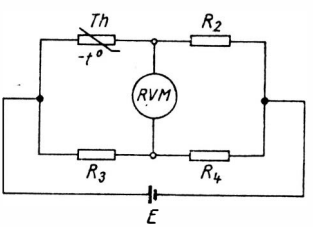


Bild 5.5
Meßschaltung mit Röhrenvoltmeter im Brückenzweig

Röhrenvoltmeter. Der Vorteil besteht darin, daß an Stelle von R_5 der hochohmige Eingangswiderstand des RVM liegt, der kaum noch die Brücke belastet. Damit vereinfachen sich die Berechnungen erheblich, d. h., sie reduzieren sich auf normale Spannungsteilerregeln. Gleichzeitig steigt die Empfindlichkeit der Meßschaltung.

Dimensionierungshinweise

a) Thermistor auswählen

b) Brückenwiderstände festlegen

$$R_2 = R_3 = R_4 = R_{20}$$

c) Zulässigen Strom I_{20} durch den Thermistor nach Formel (5.11) berechnen

d) Strom durch den Thermistor $I_{20\,gew}$ festlegen

$$I_{20\,gew} \approx {}^1/_3\, I_{20}$$

e) Spannung E nach Formel (5.15) berechnen
Die Spannung am Röhrenvoltmeter U_{RVM} beträgt dann

$$U_{RVM} = E \left(\frac{R_2}{R\vartheta + R_2} - {}^1/_2 \right) .$$

f) Eichkurve aufnehmen

6. Tabellenanhang

Tabelle 1

C-Korrekturfaktoren für die Lage und Oberflächenbeschaffenheit des Kühlblechs

Oberfläche Lage	C blank	C geschwärzt
senkrecht	0,85	0,43
waagerecht	1	0,5

Tabelle 2

λ-Wärmeleitwerte

Material	λ in W/cm K
Aluminium	2,1
Bronze	0,42
Kupfer	3,8
Messing	1,1
Stahl	0,46
Zink	1,2
Asbest	0,0069
Glaswolle	0,00042
Glimmer	0,0046
Gummi	0,0015
Leder	0,0015
Papier	0,0011 ... 0,0034
Polystyrol	0,0015
Vulkanfiber	0,003

Tabelle 3

R_{thiso} — Wärmewiderstände des Isolationsmaterials

Material	Dicke der Scheibe in μm	R_{thiso} in K/W ungefettet	R_{thiso} in K/W beiderseitig gefettet
Glimmer	50	1,25	0,5
Glimmer	100	1,5	0,7
Glimmer	150	2,5	1,7
Glimmer	400	3,2	2,5
Eloxiertes Aluminium	38	—	0,4
Eloxiertes Aluminium	300	—	0,5
Ohne	—	—	0,1 ... 0,4

Tabelle 4

α-Wärmeübergangszahlen

Bedingung bzw. Art der Ableitung	α in $\frac{W}{K\,cm^2}$
Eigenkonvektion	0,5 ... 1 10^{-3}
Luftstrom V 10 m/s	10^{-2}
Wasser V 0,01 m/s	10^{-1}

Tabelle 5

K-Faktoren

Material	d in mm	Lage und Oberflächenbeschaffenheit			
		K_{bs}	K_{gs}	K_{bw}	K_{gw}
Aluminium	1	2,19	1,84	2,28	1,91
Aluminium	2	1,55	1,30	1,61	1,35
Aluminium	3	1,26	1,06	1,32	1,11
Aluminium	4	1,09	0,92	1,14	0,96
Aluminium	5	0,98	0,82	1,02	0,86
Kupfer	1	1,63	1,37	1,69	1,42
Kupfer	2	1,15	0,97	1,20	1,01
Kupfer	3	0,94	0,79	0,98	0,82
Kupfer	4	0,81	0,68	0,85	0,71
Kupfer	5	0,73	0,61	0,76	0,64
Messing	1	3,02	2,54	3,15	2,65
Messing	2	2,14	1,80	2,22	1,87
Messing	3	1,74	1,47	1,82	1,53
Messing	4	1,51	1,27	1,57	1,32
Messing	5	1,36	1,14	1,40	1,18
Stahl	1	4,67	3,94	4,87	4,09
Stahl	2	3,30	2,78	3,44	2,89
Stahl	3	2,70	2,27	2,81	2,36
Stahl	4	2,34	1,97	2,43	2,05
Stahl	5	2,09	1,76	2,18	1,83

7. Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen

A	Querschnitt bei Leitung; Fläche allgemein
A_K	Querschnitt bei Konvektion
A_S	Querschnitt bei Strahlung
b	Energiekonstante des Thermistors
c	spezifische Wärme
C, C_{th}	Wärmekapazität
E	Spannungsquelle
$I_1 \ldots I_5$	Brückenströme
I_{20}	Strom durch den Thermistor bei $\vartheta = 20$ °C
$I_{20\,gew}$	gewählter Strom durch den Thermistor bei $\vartheta = 20$ °C
$I\vartheta$	Strom durch den Thermistor bei ϑ
l	Länge
m	Masse
P	Leistung
P_{Grenz}	Grenzleistung ohne Eigenerwärmung eines Thermistors
P_K	Wärmestrom bei Konvektion (Leistung)
P_L	Wärmestrom bei Leitung (Leistung)
P_{max}	maximal zulässige Verlustleistung
P_S	Wärmestrom bei Strahlung
P_{th}	Wärmestrom (Leistung)
P_V	Verlustleistung/Kollektorverlustleistung
P_{Vmax}	maximale Verlustleistung
P_{20}	Verlustleistung des Thermistors bei $\vartheta = 20$ °C
$P\vartheta$	Verlustleistung des Thermistors bei ϑ
Q	Wärmemenge
R	Widerstand allgemein
R_{th}	thermischer Widerstand allgemein; Wärmeübergangswiderstand allgemein
R_{tha}	thermischer Außenwiderstand
ΣR_{th}; R_{thg}	thermischer Gesamtwiderstand

R_{thGi}	Wärmeübergangswiderstand zwischen Gehäuse und Isolation
R_{thGK}	Wärmeübergangswiderstand zwischen Gehäuse und Kühlkörper
R_{thi}	Thermischer Innenwiderstand
R_{thiK}	Wärmeübergangswiderstand zwischen Isolation und Kühlkörper
R_{thiso}	Wärmewiderstand der Isolierscheibe
R_{thj}	Wärmeübergangswiderstand zwischen Sperrschicht und Gehäuse
R_{thK}	Wärmeübergangswiderstand bei Konvektion; Wärmewiderstand des Kühlblechs, Kühlprofils, Kühlkörpers
R_{thKerr}	errechneter Wärmewiderstand des Kühlkörpers
$R_{thK\ vorh}$	Wärmewiderstand des gewählten Kühlkörpers
R_{thKU}	Wärmeübergangswiderstand zwischen Kühlkörper und Umgebung
R_{thL}	Wärmeübergangswiderstand bei Leitung
R_{thS}	Wärmeübergangswiderstand bei Strahlung
$R_1 \ldots R_5$	Brückenwiderstände
R_{20}	Widerstand des Thermistors bei $\vartheta = 20$ °C
R_{100}	Widerstand des Thermistors bei $\vartheta = 100$ °C
$R\vartheta$	Widerstand des Thermistors bei ϑ
$R\vartheta_{min}$	kleinster Widerstand des Thermistors bei ϑ
$R\vartheta_{max}$	größter Widerstand des Thermistors bei ϑ
t	Zeit
$\triangle$ t	Zeitdifferenz; Zeitintervall
T	Temperatur in K
$\triangle$ T	Temperaturdifferenz in K
Th	Thermistor
$T_1; T_2$	Temperatur an der Stelle 1, 2 in K
$U_1 \ldots U_5$	Spannungsabfälle über die Brückenwiderstände
V_L	Kühlluftgeschwindigkeit
V_L'	erhöhte Kühlluftgeschwindigkeit
W_{th}	Wärmeenergie
$\triangle W_{th}$	Differenz der Wärmeenergie
α	Wärmeübergangszahl
ϑ	Temperatur

ϑ_G	Gehäusetemperatur
ϑ_{Gi}	Temperatur an der Gehäuseseite der Isolationsscheibe
ϑ_i	Innentemperatur
ϑ_{iK}	Temperatur an der Kühlkörperseite der Isolationsscheibe
ϑ_{iso}	Temperatur an der Isolierscheibe
ϑ_j	Sperrschichttemperatur
ϑ_{jmax}	maximale Sperrschichttemperatur
ϑ_{jvorh}	vorhandene, tatsächliche Sperrschichttemperatur
ϑ_K	Kühlblech-, Kühlprofil-, Kühlkörpertemperatur
ϑ_{KU}	Temperatur an der Kühlkörperseite an Umgebung
$\vartheta_{K\,gem}$	gemessene Kühlblech-, Kühlprofil-, Kühlkörpertemperatur
$\vartheta_{K\,vorh}$	vorhandene, tatsächliche Kühlblech-, Kühlprofil-, Kühlkörpertemperatur
$\vartheta_{K\,zul}$	zulässige Kühlblech-, Kühlprofil-, Kühlkörpertemperatur
ϑ_0	Oberflächentemperatur
ϑ_u	Umgebungstemperatur
ϑ_{umax}	maximale Umgebungstemperatur
ϑ_{jvorh}	vorhandene, tatsächliche Umgebungstemperatur
$\vartheta_ü$	Übertemperatur
ϑ_1	Temperatur an einem bestimmten Punkt (z. B. Anfang)
ϑ_2	Temperatur an einem späteren Punkt (z. B. Ende)
$\triangle\,\vartheta$	Temperaturdifferenz, Temperaturerhöhung
$\triangle\,\vartheta_i$	Temperaturdifferenz zwischen Sperrschicht und Gehäuse
$\triangle\,\vartheta_{iso}$	Temperaturdifferenz zwischen Gehäuse und Kühlkörper bei isolierter Montage (ohne Übergangstemperatur)
$\triangle\,\vartheta_u$	Differenz der Umgebungstemperatur
$\triangle\,\vartheta_{üGi}$	Temperaturdifferenz zwischen Gehäuse und Isolation

$\triangle \vartheta_{\text{üGK}}$	Temperaturdifferenz zwischen Gehäuse und Kühlkörper (direkte Montage)
$\triangle \vartheta_{\text{üiK}}$	Temperaturdifferenz' zwischen Isolation und Kühlkörper
$\triangle \vartheta_{\text{üKU}}$	Temperaturdifferenz zwischen Kühlkörper und Umgebung
λ	Wärmeleitzahl
σ	Strahlungskonstante
τ	Zeitkonstante allgemein
τ_{th}	thermische Zeitkonstante

8. Literaturverzeichnis

[1] *Lunze, K.:* Einführung in die Elektrotechnik; VEB Verlag Technik, Berlin 1967

[2] *Lindner, H.:* Lehrbuch der Physik – Wärmelehre; VEB Fachbuchverlag Leipzig, Leipzig 1969

[3] *Mende/Simon:* Physik – Gleichungen und Tabellen; VEB Fachbuchverlag Leipzig, Leipzig 1971

[4] *Schröder, H.:* Elektrische Nachrichtentechnik II. Band und III. Band, Verlag für Radio-Foto-Kinotechnik GmbH, Berlin-Borsigwalde 1966 und 1972

[5] *Paul, R.:* Transistormeßtechnik; VEB Verlag Technik, Berlin 1966

[6] *Wuschanski:* Thermische Probleme bei Transistoren; Fachvortrag der KdT Frankfurt (Oder) 1971

[7] *Kautsch, R.:* Elektrische Meßtechnik zur Messung nichtelektrischer Größen; VEB Verlag Technik, Berlin 1966

[8] *Erler/Walter:* Elektrisches Messen nichtelektrischer Größen mit Halbleiterwiderständen; VEB Verlag Technik, Berlin 1971

[9] *Berger, K.:* Dimensionierung von Heißleiterschaltungen; radio-fernsehen-elektronik 23 (1974), H. 3, S. 99

[10] *Rumpf, K.-H.:* Bauelemente der Elektronik; VEB Verlag Technik, Berlin 1966

[11] Katalog über Siliziumgleichrichterdioden vom Kombinat VEB Halbleiterwerke Frankfurt (Oder)

[12] Firmenunterlagen vom VEB Vereinigte NE-Metall-Halbzeugwerke Hettstedt, Leichtmetallwerk Rackwitz

[13] Katalog über Siemens Halbleiter, Datenbuch 1966 und 1971/72

[14] Kenndatenblatt: Kühlkörper für Dioden und Thyristoren; Kombinat VEB Halbleiterwerke Frankfurt(Oder), Gleichrichterwerk Stahnsdorf